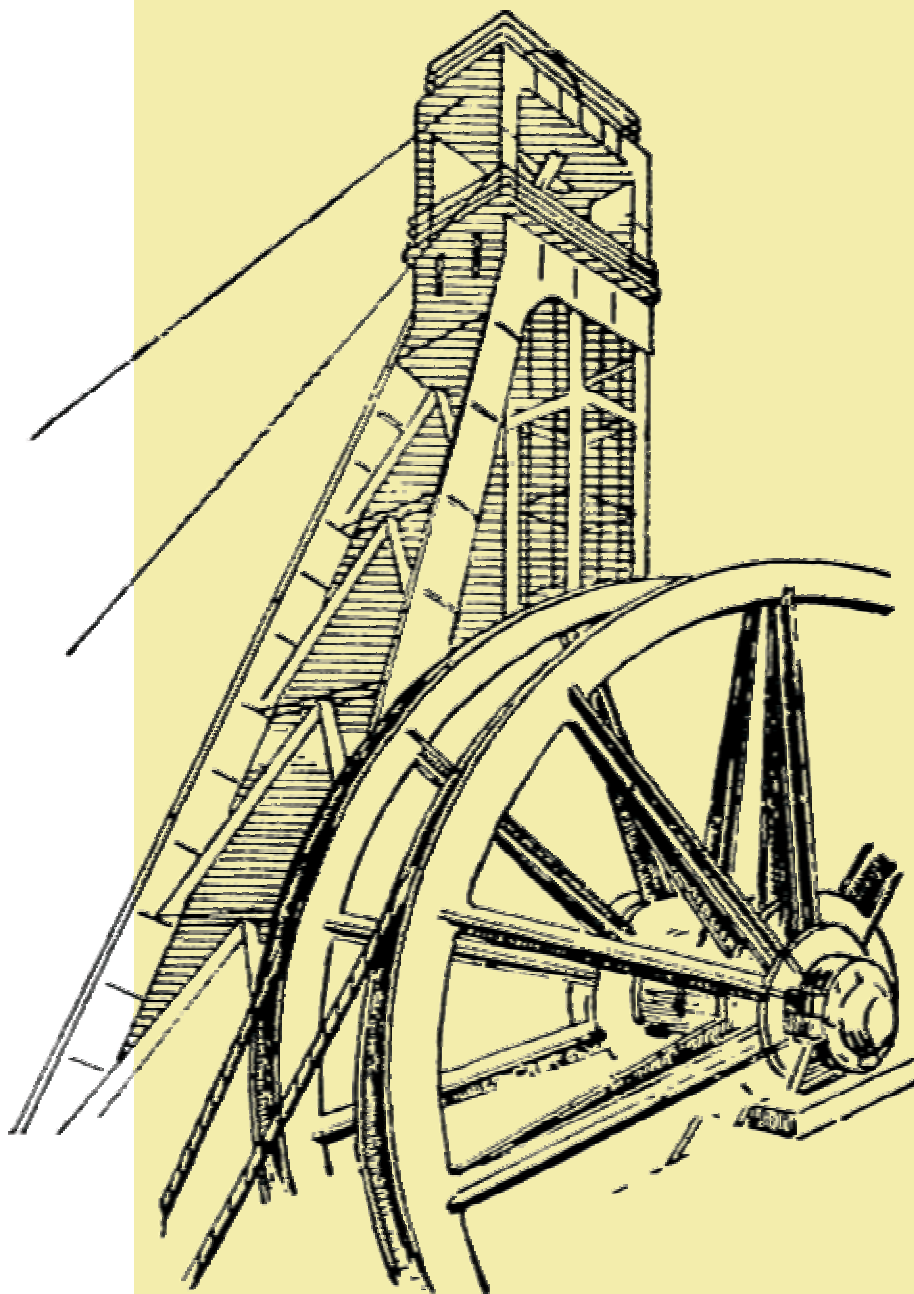


let./vol. 51 - št./no. 3/05 - str./pp. 131-182  
zvezek/issue 479

# STROJNIŠKI VESTNIK

## JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING



cena 800 SIT



ISSN 0039-2480

## Vsebina - Contents

**Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering**  
**letnik - volume 51, (2005), številka - number 3**  
**ISSN 0039-2480**

**Izhaja mesečno - Published monthly**

### **Razprave**

- Dular, M., Širok, B., Stoffel, B.: Vpliv količine plinov v vodi in hitrosti toka na agresivnost kavitacijske erozije 132  
Schweiger, V., Širok, B., Tuma, M., Mihelič, N.: Dvostopenjska vetrna turbina 146  
Juriševič, B., Kramar, D., Junkar, M.: Uporabnost obdelave z abrazivnim vodnim curkom v orodjarstvu 160  
Jovišević, V., Soković, M.: Ekspertni sistem za nadzor kota upogibanja na numerično krmiljeni upogibni stiskalnici 172

### **Poročila**

50. obletnica izhajanja Strojniškega vestnika

### **Strokovna literatura**

- Ocene knjig

### **Osebne vesti**

- Doktorati, magisteriji, specializacije, diplome

### **Navodila avtorjem**

### **Papers**

- Dular, M., Širok, B., Stoffel, B.: The Influence of the Gas Content of Water and the Flow Velocity on Cavitation Erosion Aggressiveness  
Schweiger, V., Širok, B., Tuma, M., Mihelič, N.: A Double-Stage Wind Turbine  
Juriševič, B., Kramar, D., Junkar, M.: The Versatility of Abrasive Water-Jet Machining in the Toolmaking Industry  
Jovišević, V., Soković, M.: Expert System for Metal Bending Angle Control on Numeric Control Bending Press

### **Reports**

- 178 50<sup>th</sup> Anniversary of Journal of Mechanical Engineering

### **Professional Literature**

- 179 Book's Reviews

### **Personal Events**

- 180 Doctor's, Master's, Specialization's and Diploma Degrees

- 181 **Instructions for Authors**

## Vpliv količine plinov v vodi in hitrosti toka na agresivnost kavitacijske erozije

### The Influence of the Gas Content of Water and the Flow Velocity on Cavitation Erosion Aggressiveness

Matevž Dular - Brane Širok - Bernd Stoffel

*V prispevku je predstavljena študija vpliva količine plinov v vodi in hitrosti toka na agresivnost kavitacijske erozije. Preizkusi so bili opravljeni na osamljenem profilu v kavitacijskem kanalu. Medtem ko sta bila kavitacijsko število in hitrost toka nespremenljiva, smo v korakih spreminjali količino plinov v vodi od majhne (približno 1%) do velike vsebnosti (4%). Količino plinov v vodi smo nadzorovali z generatorjem mehurčkov. Pri tem so bili narejeni preizkusi ob konstantnem kavitacijskem številu in količini raztopljenih plinov, vendar različnih hitrostih toka (10, 13 in 16 m/s). Za zaznavalo kavitacijske erozije je rabila tanka bakrena folija, nanesena na profil. Pod določeno povečavo smo posneli slike poškodovane površine bakrene folije. Za neposredno meritev kavitacijske erozije smo uporabili metodo štetja luknjic, ki temelji na računalniško podprti vizualizaciji. Preizkusi so pokazali očiten vpliv količine plinov in hitrosti toka na intenzivnost erozije. Agresivnost kavitacijske erozije se eksponentno zmanjšuje, ko večamo količino raztopljenih plinov. Potrjena je bila hipoteza o potenčnem zakonu za vpliv hitrosti toka na agresivnost kavitacijske erozije. Predstavljeni rezultati obetajo dobre možnosti za razvoj modela kavitacijske erozije ter možnost napovedi kavitacijske erozije z izključno numeričnimi metodami.*

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: kavitacija, erozija, plini v vodi, količine plinov, hitrosti tokov)**

*A study of the influence of the gas content of water and the flow velocity on cavitation erosion aggressiveness was performed. A cavitation tunnel with a single hydrofoil was used for the experiments. While the cavitation number and the mean flow velocity remained constant throughout the tests, the gas content of the water was changed in steps from low (approximately 1%) to high (4 %). The gas content of the water was adjusted with a bubble generator. In addition tests at a constant cavitation number and water gas content but different mean flow velocities (10, 13 and 16 m/s) were made. A thin copper foil, applied to the surface of the hydrofoil, was used as an erosion sensor. Images of the damaged, copper-coated hydrofoil surface were taken at an appropriate magnification. A pit-count method, based on computer-aided image processing, was used for direct measurements of the cavitation erosion by evaluating the damage on the surface of the hydrofoil. Clear evidence for the influence of the gas content and the velocity on the erosion intensity was found. The cavitation erosive aggressiveness exponentially drops when the content of the water is increased. A power law was confirmed for the velocity's influence on the cavitation erosive aggressiveness. The presented results promise the possibility of deriving a cavitation erosion model and the possibility of cavitation erosion prediction using only numerical tools in the future.*

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: cavitation, erosion, water with gas content, flow velocity)**

#### 0 UVOD

Pojav kavitacije, ki je karakteriziran z nastajanjem in kondenzacijo pare, je pogosto opazen v hidravličnih strojih. Povzroča vibracije, povečanje hidrodinamičnega upora, spremembe v

#### 0 INTRODUCTION

The cavitation phenomenon, characterised by vapour generation and condensation, occurs frequently in hydraulic machines. It causes vibration, an increase of hydrodynamic drag, changes in the

hidrodinamiki toka, hrup, toplotne in svetlobne učinke ter najpomembnejše kavitacijsko erozijo.

Kavitacijsko stanje običajno opišemo z brezrazsežnim številom (kavitacijskim številom), ki je definirano kot razlika med tlakom sistema in tlakom uparjanja (pri temperaturi sistema), deljena z dinamičnim tlakom:

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_v(T_{\infty})}{\rho \cdot v^2 / 2} \quad (1).$$

Zmanjšanje kavitacijskega števila pomeni večjo verjetnost pojava kavitacije, oziroma povečanje že opazne kavitacije.

Najpomembnejši mehanizem nastanka kavitacijske erozije je tako imenovani mikrocurek ([1] do [3]). Postopek kolapsa kavitacijskega oblaka se prične z njegovo ločitvijo od pritrjenega dela kavitacije. Oblak nato potuje s tokom in implodira v območju z višjim tlakom. Kolaps oblaka zbuja povratni tok, ki povzroči novo trganje oblaka. Sliki 1 in 2 prikazujeta trganje kavitacijskega oblaka na osamljenem profilu, ki je bil uporabljen pri preizkusih. Tok teče z leve proti desni. Slike so posnete pri hitrosti toka 13 m/s, majhni količini plinov (1,15 %) in kavitacijskem številu 2,3.

Ob kolapsu kavitacijskega oblaka se sprosti tlačni val velikostnega reda nekaj 100 kPa (preizkusi [1] kažejo na vrhove velikosti 2,5 MPa). Tlačni val, dovoljšne velikosti, vpliva na krogelno simetrijo mehurčkov, ki se nahajajo tik ob steni

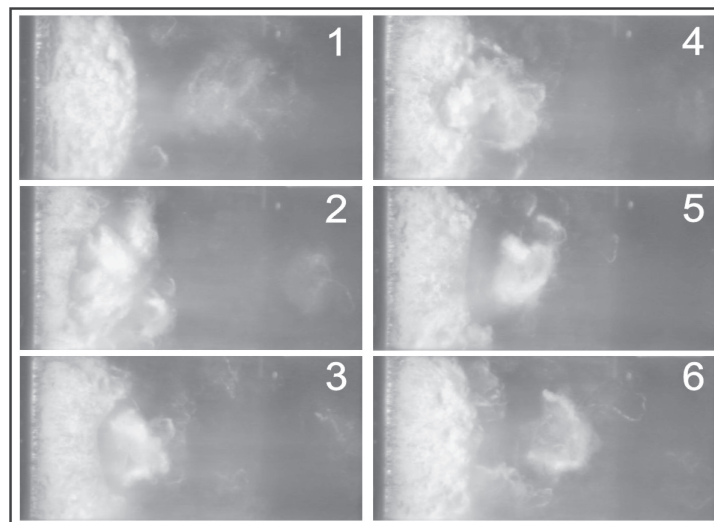
flow hydrodynamics, noise, thermal and light effects and, most important of all, cavitation erosion.

We usually describe the cavitation condition by using a non-dimensional number (the cavitation number), which is defined as the difference between the system and vapour pressure (at the system temperature) divided by the dynamic pressure:

Decreasing the cavitation number results in a higher probability of cavitation occurring or in an increase in the magnitude of the already present cavitation.

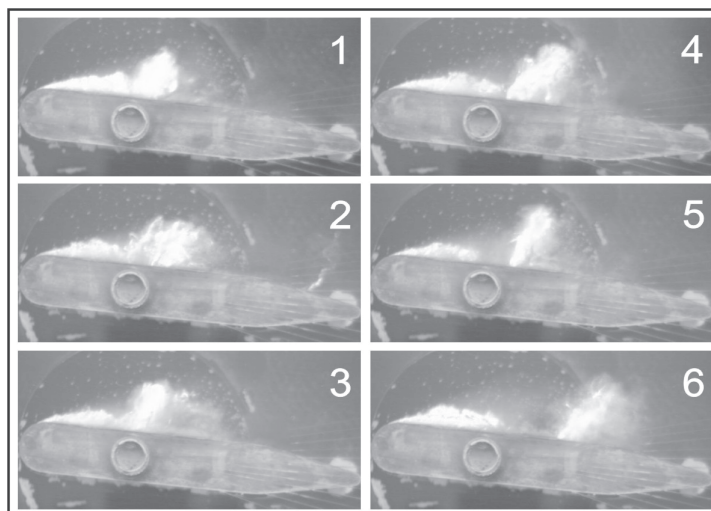
The most common mechanism of cavitation erosion is the so called micro-jet phenomenon ([1] to [3]). The process of cavitation-cloud implosion begins with its separation from the attached part of the cavitation. It then travels with the flow and collapses in the higher pressure region. Its collapse causes the formation of the backflow (re-entrant jet), which causes a new separation of the cavitation cloud. Figures 1 and 2 show the process of cavitation-cloud separation and cloud collapse on a single hydrofoil geometry that was used for the experiments. The images were taken at a flow velocity of 13 m/s, a low water-gas content (1.15 %) and cavitation number 2.3.

Because of the cavitation-cloud collapse a pressure wave with a magnitude of several 100 kPa is emitted (experiments [1] show pressure peaks with a magnitude up to 2.5 MPa). The pressure wave with sufficient magnitude acts on the bubbles with a spherical shape that are positioned close to the surface

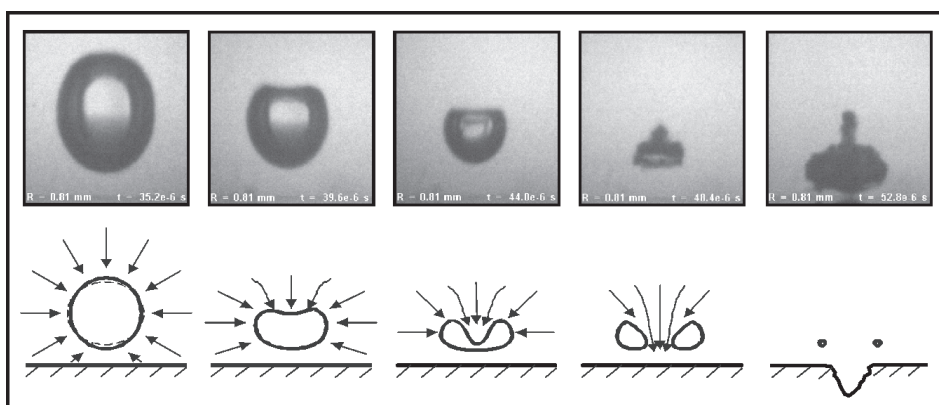


Sl. 1. Trganje in kolaps združene skupine mehurčkov (kavitacijskega oblaka) – pogled od zgoraj  
Fig. 1. Separation and collapse of the united group of bubbles (cavitation cloud) – top view





Sl. 2. Trganje in kolaps združene skupine mehurčkov (kavitacijskega oblaka) – pogled od strani  
 Fig. 2. Separation and collapse of the united group of bubbles (cavitation cloud) – side view



Sl. 3. Mehanizem mikrocurka (slike so vzete s filma, ki ga je posnel prof. Lauterborn)  
 Fig. 3. Micro-jet mechanism (pictures taken from the movie by Prof. Lauterborn)

potopljenega telesa. Oblika mehurčka postane nestabilna – začne nihati. Ob dovolj veliki amplitudi nihanja lahko pride do nastanka mikrocurka. Okoliška tekočina zavzame obliko curka skozi mehurček v smeri trdne površine (sl. 3).

Mikrocurek lahko doseže velike hitrosti, ki povzročijo udar (velikostni red je lahko večji od 1 GPa, čas trajanja je približno 1 ns, prizadeta površina pa ima red velikosti nekaj  $\mu\text{m}^2$ ) z veliko lokalno napetostjo materiala [4]. Poškodba površine zavzame obliko mikroskopske plastične deformacije – luknjice [5] (sl. 6).

Zaradi težav merjenja tlačnih udarov, ki nastanejo ob imploziji mehurčkov, velikosti

of the submerged body. The shape of the bubble becomes unstable; it begins to oscillate. If the amplitude of the oscillations is big enough, a micro-jet phenomenon can occur. The fluid that surrounds the bubble takes shape of the jet through the bubble in the direction towards the solid surface (Fig. 3).

This micro-jet can reach high local velocities that cause a shock (the order of magnitude can be bigger than 1 GPa, the duration is approximately 1 ns and the affected area is of the order of a few  $\mu\text{m}^2$ ) with high local tension of the material [4]. The damage of the surface appears in the form of microscopic plastic deformations called pits [5] (Fig. 6).

Due to difficulties with measuring the pressure peaks caused by the bubble implosions it

kavitacijske erozije ni mogoče definirati le na hidrodinamični podlagi. Metode merjenja so na primer vibracijske [6] ali pa za zaznavalo uporabimo mehke kovinske (aluminij ali baker) ali barvne prevleke potopljenega telesa ([7] do [13]). Metoda vrednotenja kavitacijske erozije, ki temelji na številu, porazdelitvi in obliki luknjic na mehki prevleki potopljenega telesa, ki so nastale zaradi implozije mehurčkov, podaja natančno poznavanje mehanizma kavitacijske erozije.

Obstaja več razlag, kako in zakaj vsebnost plinov v vodi vpliva na agresivnost kavitacijske erozije, vendar doslej še ni bilo sistematične raziskave. Obstajajo nekatere specifične raziskave vpliva lastnosti tekočin na agresivnost kavitacije. Na primer raziskave vpliva površinske napetosti vode [14]. Ugotovljeno je bilo, da zmanjšana površinska napetost vode, zmanjša agresivnost kavitacijske erozije. Razprave o vbrizgu zraka z namenom zmanjšanja in nadzora kavitacijske erozije najdemo v [1] in [2]. Nekatere razlage vpliva plinov v vodi je moč najti tudi v [15]. Glavna zamisel, ki jo podajajo omenjene študije, je, da se s povečanjem deleža plinov v vodi tej poveča stisljivost, kar posledično zmanjša agresivnost kavitacije.

Predstavljen raziskava podaja in kakovostno razlaga rezultate meritev kavitacijske erozije v štirih različnih razmerah (ob nespremenljivi hitrosti toka in kavitacijskem številu ter spreminjajoči se količini plinov v vodi).

Drugi parameter, ki vpliva na agresivnost kavitacijske erozije in je bil predmet raziskave, je hitrost toka (ob nespremenljivi količini plinov in kavitacijskem številu). Vpliv hitrosti toka je poznan. Prejšnje raziskave [16] in [17] kažejo, da se velikost poškodbe ( $A$ ) veča s potenčnim zakonom ( $n = 5$  do  $8$ ), ko večamo hitrost toka:

$$\frac{A_1}{A_2} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^n ; n = 5 \text{ do } 8 \quad (2).$$

Preizkusi so potrdili teorijo o potenčnem zakonu (ugotovljen je bil količnik  $n = 6,1$ ). Podane so tudi nekatere teoretične razlage rezultatov.

## 1 PREIZKUS

Kavitacijski preizkusi so bili narejeni v kavitacijskem kanalu v Laboratoriju za turbinske stroje in tekočinsko energetiko – Tehnične univerze v Darmstadtu.

is not possible to define the magnitude of the cavitation erosion on a purely hydrodynamic basis. The measuring methods are, for example, vibratory determination [6] or the use of soft metal (aluminium or copper) or paint coating of the submerged body as a sensor ([7] to [13]). The erosion evaluation method using the number, distribution and shape of the pits caused by bubble implosions on the soft surface coating gives us a detailed knowledge of the cavitation erosion mechanism.

There are more theories about how and why the presence of gas influences the cavitation erosion aggressiveness, but until now there has been no systematic study of the influence of the gas content of water on the aggressiveness of the cavitation. There are, however, some specific studies of the influence of liquid properties on the aggressiveness of cavitation erosion. For example, [14] deals with the influence of the water's surface tension. It was found that decreased surface tension decreases the aggressiveness of the cavitation. Discussions of air injection for the control and prevention of cavitation erosion can be found in [1] and [2]. Some brief explanations of the aeration of water are also given in [15]. The basic idea of the mentioned studies is that the water-gas content increases the compressibility of the fluid and that this consequently decreases the aggressiveness of the cavitation.

The present study shows and qualitatively explains the results of erosion measurements under four different conditions (during constant flow velocity and cavitation number and changing water-gas content).

The other studied parameter that influences the aggressiveness of the cavitation erosion was the mean flow velocity (during constant water-gas content and cavitation number). The influence of the flow velocity is well known. Past experiments [16] and [17] show that the magnitude of damage ( $A$ ) increases with the power law ( $n = 5$  to  $8$ ) when the velocity is increased:

The experiments confirmed the theory ( $n = 6.1$  was found). Some theoretical explanation of the results is also given.

## 1 EXPERIMENT

Cavitation tests were performed in a cavitation tunnel at the Laboratory for Turbomachinery and Fluid Power – Darmstadt University of Technology.

### 1.1 Priprava preizkusa

Osnovna geometrijska oblika (sl. 4), ki smo jo uporabili pri preizkusih, je bil 50 mm širok, 107,9 mm dolg in 16 mm debel simetrični profil s polkrožnim vpadnim robom ter vzporednima stenama.

Profil je bil nameščen v pravokotni testni odsek kavitacijskega kanala (sl. 5) z zaprtim obtokom. Testni odsek kanala je 500 mm dolg, 100 mm visok in 50 mm širok. Nameščeni ima dve okenci za opazovanje od zgoraj in od strani.

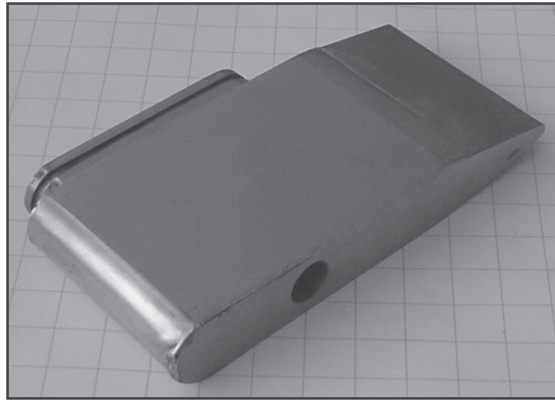
Upoštevajoč kombinacijo negotovosti meritev tlaka ( $\pm 0,2\%$ ), hitrosti ( $\pm 0,25\%$ ) in temperature ( $\pm 0,06\%$ ), je bilo moč kavitacijsko število določiti z  $\pm 0,02$  celotne negotovosti.

### 1.1 Experimental set up

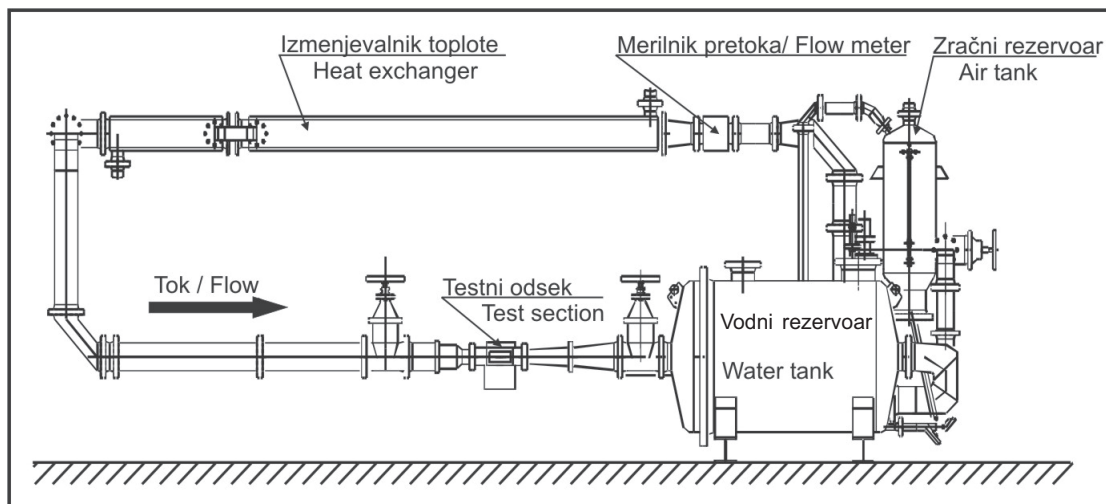
The basic geometry (Fig. 4) was a 50-mm-wide, 107.9-mm-long and 16-mm-thick symmetric hydrofoil with a circular leading edge and parallel walls.

The hydrofoil was put into a rectangular test section of the cavitation tunnel (Fig. 5) with a closed circuit. The test section of the cavitation tunnel is 500 mm long, 100 mm high and 50 mm wide. Two observation windows are mounted for top- and side-view observation.

Considering the combination of the inaccuracies of pressure ( $\pm 0.2\%$ ), velocity ( $\pm 0.25\%$ ) and temperature ( $\pm 0.06\%$ ) measurements, the cavitation number could be determined to within  $\pm 0.02$  of global uncertainty.



Sl. 4. Z bakreno folijo prevlečen profil, ki smo ga uporabili pri preizkusih  
Fig. 4. Copper-coated hydrofoil that was used for the experiments



Sl. 5. Kavitacijski kanal  
Fig. 5. Cavitation tunnel

Preglednica 1. *Parametri preizkušanih kavitacijskih stanj*  
 Table 1. *Parameters of tested cavitation conditions*

Test	$\sigma$	$v$	$\alpha$
1.	2,3	13 m/s	1,15 %
2.	2,3	13 m/s	2,15 %
3.	2,3	13 m/s	3,05 %
4.	2,3	13 m/s	4,07 %
5.	2,3	10 m/s	1,15 %
6.	2,3	16 m/s	1,16 %

Parametre preizkusov podaja preglednica 1.

Vpadni kot profila je bil za vse preizkuse enak in je znašal 5°.

Kavitacijski kanal ponuja možnost nastavljanja količine plinov v vodi. Merimo lahko le skupno količino plinov v vodi, se pravi količino raztopljenih in neraztopljenih plinov v vodi. Ocenjeno je, da je pri tlaku sistema, količina raztopljenih plinov v vodi za nekaj velikostnih redov večja od količine prostih plinov. Če želimo doseči majhno stopnjo plinov v vodi, pustimo tok nekaj časa teči pri nizkem tlaku (20 kPa). Ker je stanje nasičenosti vode s plini pri nizkem tlaku nižje, se plini sprostijo in izločijo. Na ta način je mogoče doseči približno 1 % (prostorninski delež) plinov v vodi.

Za zagotovitev velikega deleža plinov uporabimo generator mehurčkov. Z uporabo generatorja mehurčkov v ločenem rezervoarju dobimo s plini nasičeno vodo pod visokim tlakom (2 MPa). Nasičeno vodo nato skozi več šob premera 0,1 mm vbrizgamo v sistem kavitacijskega kanala. Tako je mogoče doseči skoraj nasičeno stanje vode pri tlaku sistema. Največji prostorninski delež plinov, ki ga je mogoče zagotoviti, je približno 4,2 %.

Negotovost merjenja količine raztopljenih plinov v vodi je +/- 1 % merjene vrednosti.

## 1.2 Metoda štetja luknjic

Zaradi problemov s ponovljivostjo mehanskih lastnosti galvanskega nanosa bakra so bile meritve prejšnjih raziskav omejene le na majhno površino. Erozijska je bila vrednotena na vzorcih iz čistega bakra, ki so bili vstavljeni v profil ([2], [12] in [13]). Študija erozije je bila omejena na čas inkubacije, se pravi na čas, ko že zaznamo poškodbo površine (plastične deformacije - luknjice), ne pa tudi odnašanja materiala. Da bi dobili informacije o eroziji na celotni površini profila, smo na njegovo površino z lepilnim filmom namestili 0,2 mm debelo polirano

The parameters of the experiments can be found in Table 1.

The incidence angle was held constant at 5° for all the tests.

The cavitation tunnel system gives the possibility to adjust the content of the gases in the water. If a low gas content is desired we let the flow run at low pressure (approximately 20 kPa) for some time. Since the saturation level of the gases at low pressure in water is smaller than at high pressure, the gases are freed and a low gas content is reached. In this way we can achieve approximately 1% volume fraction of gas in the water.

To reach a high level of gas content a bubble generator system is used. With a bubble generator, water that is practically saturated with gas at high pressure (2 MPa) is achieved in a separate tank. The saturated water is then injected into the cavitation tunnel system through multiple nozzles with a diameter of 0.1 mm. It is possible to reach the almost saturated condition of water-gas content at system pressure in this way. The maximum volume fraction of gas content that can be reached is approximately 4.2 %.

The uncertainty of the measurements of water-gas content was +/- 1 % of the measured value.

## 2.2 Pit-count method

Due to problems with the reproducibility of the galvanic copper-coating method, only a small part of the surface was investigated for the cavitation erosion in previous investigations. This was done using pure copper specimens inserted into the hydrofoil ([2], [12] and [13]). To get information about the erosion on the whole surface of the hydrofoil, a polished copper foil, 0.2 mm thick, was fixed to its surface using adhesive film. The hardness of the copper coating was approximately 40 HV. A sufficient number of pits was obtained after 1 hour of exposure



bakreno folijo. Površinska trdota bakrene folije je bila približno 40 HV. Zadostna količina luknjic je bila dosežena po tem, ko je bil profil za eno uro izpostavljen kavitirajočemu toku (čas preizkusov je bil nespremenljiv).

Luknjice imajo premer velikostnega reda  $10^{-5}$  m in so vidne šele pod določeno povečavo. Slike poškodovane površine so bile narejene z mikroskopom Olympus BX-40 in CCD kamero.

Povečava je bila 50:1, kar je dalo ločljivost  $1,95 \mu\text{m}$  na točko. Za vsako merjeno kavitacijsko stanje je bilo narejenih 925 slik površine (vsaka slika je merila  $1,09 \times 1,46$  mm). Ovrednotena površina je predstavljala približno 48 % z bakreno folijo prekrite površine profila.

Slika 6 prikazuje sliko površine pred preizkusom (levo) (0 % poškodovane površine) in po preizkusu (desno) (4,98% poškodovane površine).

Intenzivnost kavitacijske erozije je bila določena z metodo štetja luknjic. Temelj metode je predpostavka, da površina poškodovane površine v določenem času podaja kolikostno merilo intenzivnosti kavitacijske erozije.

Metoda štetja luknjic, ki je bila razvita v Laboratoriju za turbinske stroje in tekočinsko energetiko, kot luknjice prepozna temnejša območja na sliki, medtem ko svetlo območje obravnava kot nepoškodovano površino (natančen opis dvorazsežne optične analize luknjičaste površine najdemo v [5]).

Sliko površine rekonstruiramo s krožnim strukturnim elementom. Ugotovljeno je bilo, da da krožni element s premerom 8 točk (približno  $16 \mu\text{m}$ ) najugodnejše rezultate.

Problem, ki ga je treba upoštevati je tudi možno prekrivanje luknjic. Gruče luknjic nastanejo po naključju pri daljših preizkusih, ob kolapsu skupine mehurčkov ali ob večkratnem kolapsu enega mehurčka.

to the cavitating flow (the exposure time was constant for all tests).

Pits have a diameter of magnitude order  $10^{-5}$  m, and can be distinguished only with sufficient magnification. Images of the pitted surface were acquired using an Olympus BX-40 microscope and a CCD camera.

The enlargement scale was 50:1, leading to a resolution of  $1.95 \mu\text{m}$  per pixel. A total of 925 images (one image embraces an area of  $1.09 \times 1.46$  mm) of the pitted surface were taken for each operating point (the part of the surface evaluated by the images represents approximately 48 % of the copper-coated hydrofoil surface).

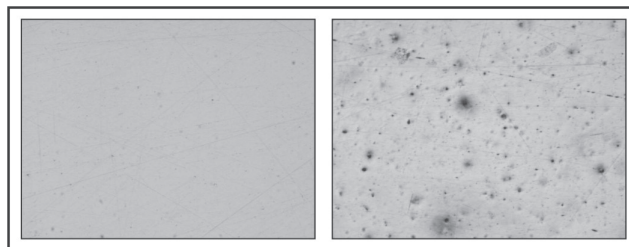
Fig. 6 shows an image of the surface before the exposure to cavitating flow (left) (0 % eroded surface) and after 1 hour of exposure (right) (4.98 % eroded surface).

The intensity of cavitation erosion was determined by the pit-count method. The method is based on the assumption that the area of the surface that is covered by pits after a certain time of exposure to cavitating flow gives a quantitative measure of the intensity of the cavitation erosion.

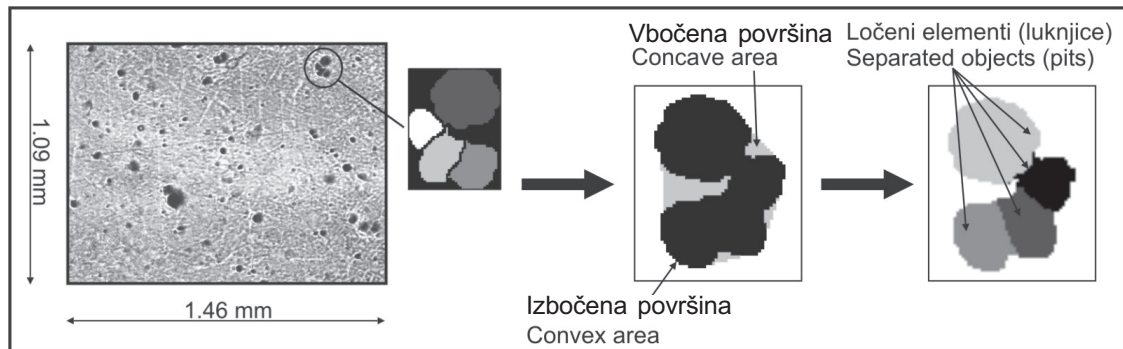
The pit-count software developed at the Laboratory for Turbomachinery and Fluid Power determines the pits from the darker regions in an image, while the brighter area is assumed to be undamaged surface (a detailed description of optical 2D analyses of a pitted surface can be found in [5]).

The surface image is reconstructed by using a circular structuring element. It has been determined that a circularly shaped structural element that is 8 pixels (about  $16 \mu\text{m}$ ) in diameter gives the most reliable results.

A problem that has to be considered is the possibility of the overlapping of the pits. Pit clusters are created by chance during longer tests, by the collapse of a group of bubbles or by rebounds of a single bubble.



Sl. 6. Slika površine pred preizkusom (levo) in po preizkusu (desno)  
 Fig. 6. Image of surface prior (left) and after (right) the exposure to the cavitating flow



Sl. 7. Prepoznavanje luknjic na površini z metodo štetja luknjic  
 Fig. 7. Detection of pits on the surface using the pit-count method

Načelo, po katerem ločimo skupino luknjic, temelji na predpostavki, da osamljena luknjica ne more zavzeti vbočene oblike. Tako vbočene elemente na sliki razdelimo na več elementov izbočene oblike. Osamljeni elementi so nato povečani, da zapolnijo izvorno obliko luknjice. Če je slikovni element sestavljen iz prekrivajočih se luknjic, je mogoče, da je posamezna slikovna točka skupna dvema ali več luknjicam (Sl. 7).

Metoda štetja luknjic podaja porazdelitev števila in površine luknjic, posledično pa porazdelitev intenzivnosti kavitacijske erozije po površini.

## 2 REZULTATI

Prikazane so porazdelitve intenzivnosti kavitacijske erozije po površini profilov za parametre, podane v preglednici 1. Vrednosti med posameznimi merilnimi točkami (slikami površine) so dopolnjene z interpolacijsko metodo Kriging. Vrednost spremenljivke erodirana površina (*EP*) podaja delež celotne poškodovane površine (delež površine, ki je prekrita z luknjicami):

$$EP = \frac{\sum_{i=1}^{925} A_{pi}}{\sum_{i=1}^{925} A_i} \cdot 100 \% \quad (3)$$

Rezultati poškodb površine ob spremenljivi količini plinov v vodi so predstavljeni na sliki 8. Tok teče od spodaj navzgor. Merilo pomeni lokalno vrednost erodirane površine (belo 0 %, črna 10 %).

Vidimo, da se ob povečanju količine plinov v vodi agresivnost erozije očitno zmanjša. Pri velikem deležu vsebnosti plinov (4,07 %) utrpi površina

The principle that is used for pit separation is that a single pit cannot form a concave shape. Hence, a concavely shaped dark region is divided into a number of individual objects, each having a convex shape. The separated objects are then enlarged to fill out the original object size. If an image object is caused by overleaping pits it is possible that one pixel is shared by two or more pits (Fig. 7).

The pit-count method gives a distribution of the number and the area of the pits and consequently the distribution of the magnitude of cavitation erosion on the surface.

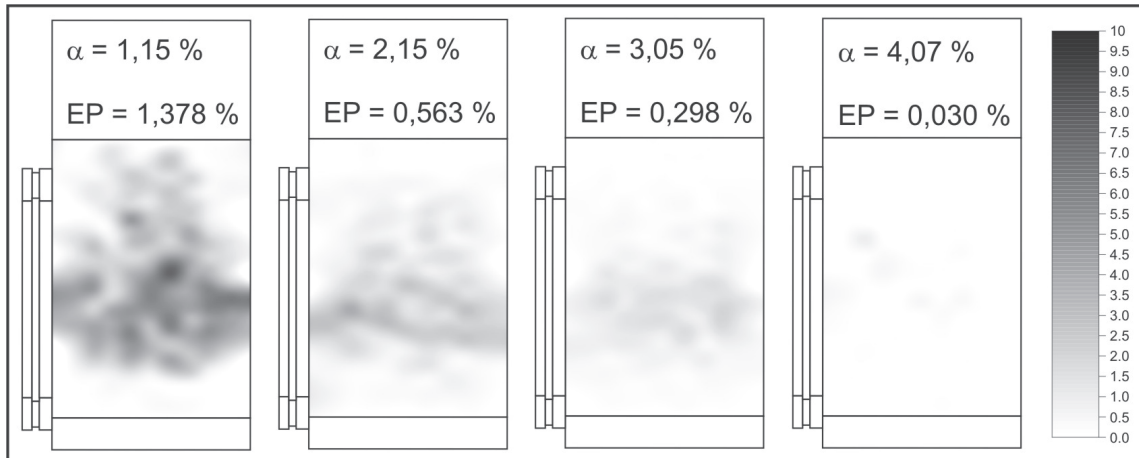
## 2 RESULTS

The distributions of the magnitude of cavitation erosion on the surfaces of the hydrofoils for parameters given in Tab. 1 are presented. The values between the evaluation points (surface images) are determined using the Kriging interpolation scheme. The value of the eroded surface (*EP*) represents the part of the whole surface that is damaged (covered by pits):

The results of the surface damage for the variations of water-gas content are shown in Figure 8. The flow is from the bottom to the top. The scale represents the local percentage of eroded surface (white 0 %, black 10 %).

One can see that the erosive aggressiveness decreases significantly when the gas content rises. The surface sustains almost 50 times less damage in the case





Sl. 8. Porazdelitev velikosti poškodbe za različne deleže plinov v vodi  
 Fig. 8. Erosion magnitude distribution for different water-gas contents

skoraj 50-krat manjšo količino poškodb, kakor pri majhnem deležu plinov (1,15 %). Ker je bilo kavitacijsko število skozi preizkuse nespremenljivo, ostajata mesto največje erozije ter porazdelitev luknjic po površini profila za vse primere enaka (topologija kavitacijskih struktur se ob spremembi deleža plinov vodi praktično ne spremeni). Če primerjamo porazdelitev luknjic s slikami kavitacijskih struktur (sl. 1, 2), vidimo, da se mesto največje erozije ujema z mestom, kjer pride do trganja kavitacijskega oblaka.

Slika 9 prikazuje diagram spremenljivke  $EP$  kot funkcije količine plinov v vodi.

Vidimo, da agresivnost kavitacijske erozije (karakterizirana s parametrom  $EP$ ) eksponentno pada, ko večamo količino plinov v vodi.

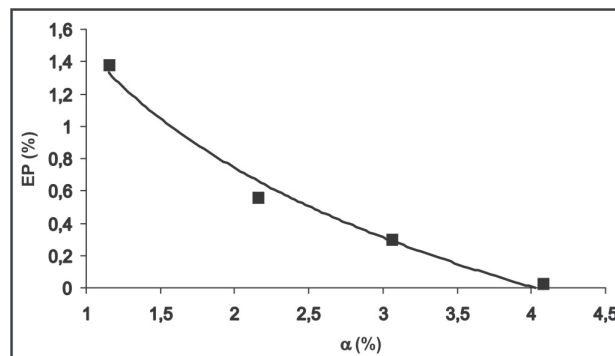
Razlogi za manj agresivno kavitacijsko erozijo zaradi večjega deleža plinov v vodi so:

of a high gas content (4.07 %) than in cases with a low gas content (1.15 %). The position of maximum erosion magnitude and the distribution of the pits on the hydrofoil remain constant for all the cases, since the cavitation number was constant (the topology of the cavitation structures does, in practical terms, not change when the gas content is altered). Comparing the distribution of the pits with the images of cavitation (Fig. 1 and 2) one can see that the maximum magnitude of the cavitation damage corresponds to the point where the cavitation cloud separates from the attached part of the cavitation.

Figure 9 shows a diagram of  $EP$  as a function of water-gas content.

It can be seen that the aggressiveness of the cavitation erosion (characterised by  $EP$  parameter) decreases exponentially when the gas content is increased.

The reasons for the less aggressive cavitation erosion due to the increase of the water-gas content are:



Sl. 9. Erodirana površina ( $EP$ ) kot funkcija količine plinov v vodi  
 Fig. 9. Eroded surface ( $EP$ ) as a function of gas content

- Voda z več raztopljenimi plini ima večjo stisljivost. Dušenje tlačnega vala, ki nastane ob kolapsu kavitacijskega oblaka je tako večje – amplituda vala je manjša, ko ta doseže površino profila. Hitrost mikrocurka  $v_{jet}$ , ki je sorazmerna s tlakom, ki obdaja mehurček blizu površine, je tako manjša.
- Pri večjem deležu plinov je gostota tekočine manjša.
- V območju kavitacije, kjer je tlak precej nižji od systemskega tlaka (približno 2 kPa), se raztopljeni plini sprostijo v obliki mehurčkov. Večja začetna količina plinov v vodi vpliva na večjo količino sproščenih mehurčkov. Zaradi tega je hitrost zvoka v mešanici mehurčkov in vode odvisna od začetnega deleža plinov v vodi.

Napetost v materialu, ki jo povzroči udarec mikrocurka, je primerljiva z napetostjo ob vodnem udaru ( $p = v_{jet} \cdot c \cdot \rho$ ) [18]. Verjetno je, da kombinacija prej omenjenih razlogov (zmanjšanje hitrosti mikrocurka  $v_{jet}$ , zmanjšanje gostote tekočine  $\rho$  in zmanjšanje zvočne hitrosti  $c$ ) vpliva na drastično zmanjšanje agresivnosti kavitacijske erozije pri povečanju deleža plinov v vodi.

Slika 10 prikazuje rezultate preizkusov s spremenljivo hitrostjo toka. Količina plinov v vodi je bila pri preizkusih skoraj nespremenljiva (pregl. 1), tako da je na agresivnost kavitacijske erozije vplivala le hitrost toka.

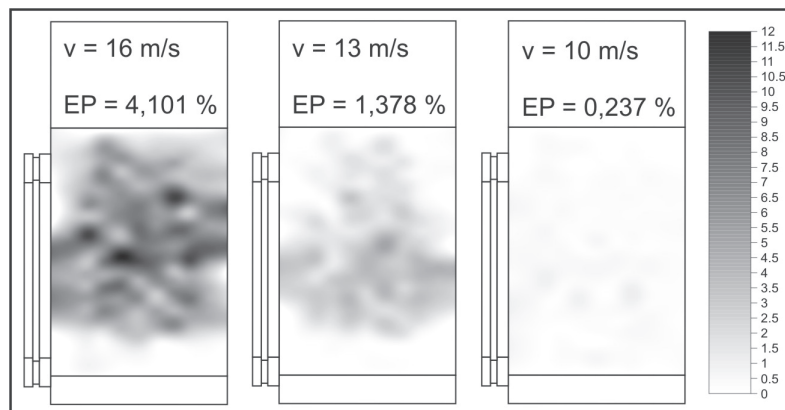
Tok teče od spodaj navzgor. Merilo predstavlja lokalno vrednost erodirane površine (belo 0 %, črno 12 %).

- The water with higher gas content is more compressible, hence the attenuation of the shock wave that is emitted during the bubble-cloud collapse is higher – the magnitude of the shock wave as it reaches the surface of the hydrofoil is smaller. The micro-jet velocity  $v_{jet}$  that is proportional to the pressure surrounding the bubble near the surface is therefore smaller.
- The density of the fluid is smaller at a high gas content.
- In the region where cavitation occurs is the pressure much smaller than the system pressure (approximately 2 kPa). The gases that are dissolved in the water are released in the form of bubbles. The bigger the initial gas content the more bubbles are released. The sonic velocity  $c$  is therefore a function of the initial gas content of the water.

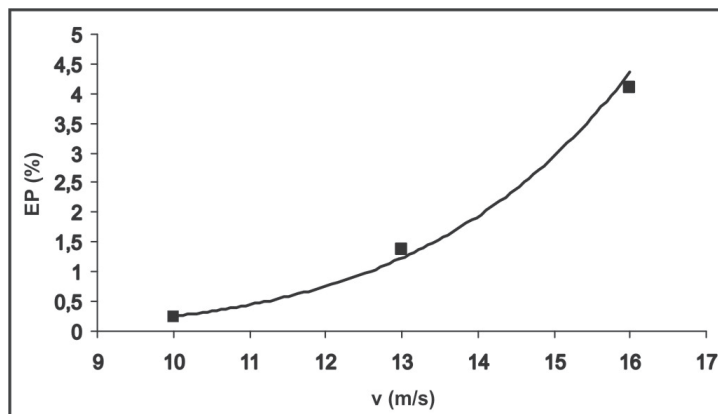
The stress applied to the material during a micro-jet impact can be considered to be of the same magnitude as the water hammer stress ( $p = v_{jet} \cdot c \cdot \rho$ ) [18]. Combining the before-stated reasons (decrease of the micro-jet velocity  $v_{jet}$ , decrease of the fluid density  $\rho$  and decrease of the sonic velocity  $c$ ) could explain the drastic decrease of the aggressiveness of cavitation erosion when the gas content is increased.

Figure 10 represents the results of tests with a mean flow-velocity variation. The gas content of water remained almost the same for the experiments (Tab. 1), so only the flow velocity influenced the aggressiveness of the cavitation erosion.

The flow is from the bottom to the top. The scale represents the local percentage of eroded surface (white 0 %, black 12 %).



Sl. 10. Porazdelitev velikosti poškodbe za različne hitrosti toka  
 Fig. 10. Erosion magnitude distribution for different mean-flow velocities



Sl. 11. Erodirana površina ( $EP$ ) kot funkcija hitrosti toka  
 Fig. 11. Eroded surface ( $EP$ ) as a function of mean flow velocity

Povezava med hitrostjo toka in erozijo je očitna. Kavitacija je precej agresivnejša pri večjih hitrostih toka. Ker je bilo kavitacijsko število za vse preizkuse enako, lahko, kakor pri preizkusih s spreminjajočim se deležem plinov v vodi, opazimo, da je porazdelitev luknjic in mesto največje erozije podobno za različne hitrosti toka.

Diagram na sliki 11 prikazuje spremenljivko  $EP$  kot funkcijo hitrosti toka.

Zopet je vidno očitno povečanje agresivnosti kavitacijske erozije z večanjem hitrosti toka. Vzpostavljen je bil potenčni zakon (en. 2) z  $n=6,1$ .

Ker je nastanek luknjice zelo zapleten pojav, vrednosti količnika  $n$  v potenčnem zakonu ni preprosto razložiti. Nekateri razlogi za povečanje agresivnosti kavitacije, ko se poveča hitrost toka, so:

- Če je kavitacijsko število (en. 1) nespremenljivo, se mora pri spremembi hitrosti razlika tlakov spremeniti kvadratično. To pomeni, da se bo amplituda tlačnega vala, ki se sprosti ob kolapsu kavitacijskega oblaka, prav tako povečala z eksponentom 2.
- Znano je, da je Strouhalovo število (en. 4) za enako kavitacijsko število razmeroma nespremenljivo. Torej se povečanje hitrosti toka kaže v linearnem povečanju frekvence trganja kavitacijskih oblakov; sledi povečanje kolapsov kavitacijskih oblakov, tlačnih valov, udarcev mikrocurkov ob površino in nazadnje luknjic. Strouhalovo število je definirano z:

$$St = \frac{f \cdot d}{v} \quad (4),$$

kjer so:  $f$  značilna frekvenca trganja kavitacijskega oblaka,  $d$  značilna (srednja) dolžina kavitacije

An obvious relation between the flow velocity and the erosion rate can be seen: the cavitation is much more aggressive at higher flow velocities. As in the case with varying gas content the distribution of the pits and the position of the maximum magnitude of damage is similar for all the tests, since the cavitation number was held constant.

The diagram in Figure 11 shows the variation of  $EP$  with flow velocity.

Once again an obvious increase of cavitation erosion aggressiveness with velocity can be seen. A power law relation (Eq. 2) with  $n=6.1$  was determined.

Since the pit-formation process is a very complicated phenomenon, the value of the coefficient  $n$  of the power law cannot be easily explained. Some reasons for the increase of the cavitation aggressiveness when the flow velocity increases are:

- When the cavitation number (Eq. 1) is constant the pressure difference has to increase with a power of 2 when the velocity is increased. This means that the pressure emitted during bubble-cloud collapse will also rise with the power of 2.
- It is known that the Strouhal number (Eq. 4) remains relatively constant for the same cavitation number [1], hence the increase of the flow velocity leads to a linear increase of the shedding frequency – there are more cavitation-cloud collapses and consequently more shock waves, micro-jet impacts and finally pits. The Strouhal number is defined as:

where  $f$  is the significant shedding frequency,  $d$  is the characteristic cavitation-cloud length (remains

(ostaja nespremenjena za nespremenljivo kavitacijsko število [1]) in  $v$  hitrost toka.

- V toku obstaja končno število mehurčkov, ki imajo možnost za nastanek mikrocurka. Ker je čas implozije mehurčka (približno 1 ns) precej manjši od časa, ki ga mehurček potrebuje od vstopa do izstopa iz nadzorne prostornine (približno 1 ms), je verjetnost implozije mehurčka v obliki mikrocurka neodvisna od hitrosti toka (hipotezo so potrdili tudi prejšnji preizkusi, npr. [16] govori o verjetnosti 1/30000). Ob povečanju hitrosti se glede na časovni korak število mehurčkov, ki implodirajo v obliki mikrocurka, poveča.

Opisani razlogi bi zadostili povečanju agresivnosti kavitacije za količnik 4. Vendar pa je, kakor smo že omenili, celoten postopek nastanka luknjice (kolaps kavitacijskega oblaka, dušenje amplitude tlačnega vala, nastanek mikrocurka ter vpliv parametrov materiala, ki ga uporabljamo za zaznavalo kavitacijske erozije) prezapleten, da bi lahko vrednost količnika  $n = 5$  do 8 razložili na ta način. Podamo lahko le razloge, ki vodijo do povečanja agresivnosti.

#### 4 SKLEPI

Opisana je bila raziskava vpliva količine plinov v vodi in vpliva hitrosti toka na agresivnost kavitacijske erozije. Metoda štetja luknjic in metoda nanosa tanke bakrene folije na površino profila sta se pokazali kot primerni za meritve kavitacijske erozije.

Preizkusi so pokazali očiten vpliv količine plinov v vodi na agresivnost kavitacijske erozije. Pokazala se je eksponentna zveza, ki je bila tudi kakovostno utemeljena.

S preizkusi smo preverjali in uspešno potrdili hipotezo o potenčni zvezi med hitrostjo toka in agresivnostjo kavitacijske erozije. Prejšnje raziskave so pokazale, da količnik  $n$  leži med 5 in 8. Pri prikazani raziskavi je bila določena vrednost količnika 6,1. Podane so tudi nekatere razlage velikega vpliva hitrosti toka na agresivnost kavitacije.

Naslednji korak je povezava rezultatov, ki smo jih dobili z metodo štetja luknjic, z dejansko količino odnesenega materiala. Vzpostavljena povezava bi lahko vodila do precej krajših preizkusov odpornosti materiala na kavitacijsko erozijo.

Končni cilj raziskave je vzpostavitev splošnih povezav in zakonov, ki določajo porazdelitev in velikost poškodb kavitacije, ter razvoj ekspertnega sistema za nadzor kavitacije v hidravličnih strojih.

constant with a constant cavitation number [1]) and  $v$  is the flow velocity.

- There is a finite number of bubbles that have the potential to form a micro-jet in the flow. Since the time of bubble implosion (approximately 1 ns) is much smaller than the time needed for the transition of the bubble through the control volume (approximately 1 ms) the probability that a bubble will implode in micro-jet form does not alter with velocity (this hypothesis was also confirmed by past experiments, for example [16] speaks of a probability of 1/30000). Hence, when the velocity is increased, more bubbles implode in the form of a micro-jet in a certain time period.

The stated reasons sum up to the power of 4. But as was stated before, the processes included in pit formation (bubble-cloud collapse, the attenuation of the pressure wave, the micro-jet formation and the parameters of the material used as erosion sensor) are too complicated for the factor  $n = 5$  to 8 to be explained in this manner. We can only suggest where the reasons might lie.

#### 4 CONCLUSIONS

A study of the water-gas content and the flow velocity influence on the aggressiveness of cavitation erosion was presented. A pit-count technique combined with copper coating proved to be a well suited method for measurements of the cavitation erosion.

A clear influence of the water-gas content on the cavitation erosion aggressiveness was found. An exponential relation was established and qualitatively explained.

The well-known power-law for the velocity influence on the cavitation erosion was also tested and successfully confirmed. Previous experimental studies found the factor  $n$  to lie between 5 and 8; for these experiments the factor was determined to be 6.1. Also, some explanations for the strong influence are given.

The next step is to link the pit-count results with the actual material mass loss. A possible correlation could lead to a much shorter duration of the tests concerning the material's resistance to cavitation erosion.

The final goal of the research is to find general correlations and rules that determine the distribution and magnitude of damage caused by the cavitation erosion and the development of an expert system for monitoring and controlling the cavitation in hydraulic machines.

5 LITERATURA  
5 REFERENCES

- [1] Böhm, R. (1998) Erfassung und hydrodynamische Beeinflussung fortgeschrittener Kavitationszustände und ihrer Aggressivität - PhD Thesis. *Technische Universität Darmstadt*, Darmstadt.
- [2] Hofmann, M. (2001) Ein Beitrag zur Verminderung des erosiven Potentials kavitierender Stömungen - PhD Thesis. *Technische Universität Darmstadt*, Darmstadt.
- [3] Lohrberg, H. (2001) Messung und aktive Kontrolle der erosiven Aggressivität der Kavitation in Turbomaschinen - PhD Thesis. *Technische Universität Darmstadt*, Darmstadt.
- [4] Reboud, J.L., R. Fortes-Patella, A. Archer (1999) Analysis of damaged surfaces: Part I: Cavitation mark measurements by 3D laser profilometry. *Proceedings of the 3rd ASME / JSME Joint Fluids Engineering Conference*, San Francisco CA.
- [5] Lohrberg, H., M. Hofmann, G. Ludwig, B. Stoffel (1999) Analysis of damaged surfaces: Part II: Pit counting by 2D optical techniques. *Proceedings of the 3rd ASME / JSME Joint Fluids Engineering Conference*, San Francisco CA.
- [6] Bourdon, P., R. Simoneau, J.M. Dorey (1994) Accelerometer and pitcount detection of cavitation erosion on a laboratory jet and a large francis turbine. *XVII LAHR Symp.*, Beijing.
- [7] Ito, Y., R. Oba (1994) Comparison between four practical methods to detect the erosive area in cavitating flows. *XVII LAHR Symp.*, Beijing.
- [8] Simoneau, R. (1995) Cavitation pit counting and steady state erosion rate, *Int. Symp. on Cavitation Cav'95*, Deauville.
- [9] Lavigne, S., A. Retailleau, J. Woillez (1995) Measurement of the aggressivity of erosive cavitating flows by a technique of pits analysis. Application to a method of prediction of erosion, *Int. Symp. On Cavitation Cav'95*, Deauville.
- [10] Bachert, B., G. Ludwig, B. Stoffel, B. Sirok, M. Novak (2003) Experimental investigations concerning erosive aggressiveness of cavitation in a radial test pump with the aid of adhesive copper films. *Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan.
- [11] Escaler, X., M. Farhat, F. Avellan, E. Eguisquiza (2003) Cavitation erosion tests on a 2D hydrofoil using a surface-mounted obstacles. *Wear 254*, 441-449, Elsevier.
- [12] Dular, M., B. Sirok, M. Novak, M. Hocevar, B. Stoffel, G. Ludwig (2002) Development of the cavitation erosion prediction method in hydraulic machines. *15th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM 2002)*, Birmingham, UK, September 2-4.
- [13] Sirok, B., M. Dular, M. Novak, M. Hocevar, B. Stoffel, G. Ludwig, B. Bachert (2002) The influence of cavitation structures on the erosion of a symmetrical hydrofoil in a cavitation tunnel. *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 48, No. 7, 368-378.
- [14] Iwai, Y., S. Li (2003) Cavitation erosion in waters having different surface tensions. *Wear 254*, 1-9, Elsevier.
- [15] Eisenhauer, N. O. (1995) The effect of aeration on cavitation erosion. *Int. Symp. On Cavitation Cav'95*, Deauville.
- [16] Knapp, R.T., J.W. Daily, F.G. Hammitt (1970) Cavitation. *McGraw-Hill Book Company*, London.
- [17] Bachert, B., M. Dular, G. Ludwig, B. Stoffel, S. Baumgarten (2004) Experimental investigations concerning erosive aggressiveness of cavitation at different test configurations. *Proceedings of the ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference*, Westin Charlotte, North Carolina, USA.
- [18] Plesset, M. S., R.B. Chapman (1971) Collapse of an innitially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 47, 283-290.

Naslova avtorjev: Matevž Dular  
prof.dr. Brane Širok  
Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za strojništvo  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana  
matevz.dular@fs.uni-lj.si  
brane.sirok@fs.uni-lj.si

Prof.Dr. Bernd Stoffel  
Darmstadt Univ. of Technology  
Laboratory of Turbomachinery  
and Fluid Power  
Magdalenenstrasse 4  
D-64289 Darmstadt, Germany  
stoffel@tfa.maschinenbau.tu-darmstadt.de

Authors' Addresses: Matevž Dular  
Prof.Dr. Brane Širok  
University of Ljubljana  
Faculty of Mechanical Eng.  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana, Slovenia  
matevz.dular@fs.uni-lj.si  
brane.sirok@fs.uni-lj.si

Prof.Dr. Bernd Stoffel  
Darmstadt Univ. of Technology  
Laboratory of Turbomachinery  
and Fluid Power  
Magdalenenstrasse 4  
D-64289 Darmstadt, Germany  
stoffel@tfa.maschinenbau.tu-darmstadt.de

Prejeto: 7.4.2004  
Received:

Sprejeto: 24.2.2005  
Accepted:

Odrpno za diskusijo: 1 leto  
Open for discussion: 1 year



## Dvostopenjska vetrna turbina

### A Double-Stage Wind Turbine

Vlado Schweiger - Brane Širok - Matija Tuma - Niko Mihelič

*V prispevku je predstavljen postopek za povečanje izrabe energije vetra z uvedbo dvostopenjske nasproti se vrteče vetrne turbine. Teoretični aerodinamični izkoristek, poznan kot Betzova meja, se pri tem poveča iz 0,593 na 0,640. V nadaljevanju je predstavljen numerični model, s katerim je bila izdelana analiza tokovnih in energetskih lastnosti za eno- in dvostopenjsko vetrno turbino. Rezultati kažejo na dejansko povečanje izkoristka z vpeljavo druge stopnje, kar potrjuje smotrnost nadaljevanja študije.*

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: turbine vetrne, turbine dvostopenjske, izkoristek aerodinamični, analize numerične)**

*In this paper we present an approach to increasing the wind-energy efficiency of a turbine by using a double-stage counter-rotating wind-turbine installation. The theoretical, aerodynamic efficiency, known as the Betz limit, is increased from 0.593 up to 0.640. A numerical analysis was made to establish the power and kinematic characteristics of single- and double-stage models. The results of the analysis show a significant increase in the aerodynamic efficiency with a second-stage installation. These results point toward the need for a further investigation of the double-stage model.*

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: wind turbines, double-stage turbines, aerodynamic efficiency, numerical analysis)**

#### 0 UVOD

Izkoriščanje vetrne energije sega približno 3000 let v zgodovino. Do začetka sodobne industrializacije je bila kinetična energija vetra, poleg potencialne energije vode, pomemben vir mehanskega dela. S pričetkom izrabljanja fosilnih goriv, ki pomenijo stalnejši vir energije, je začel veter izgubljati pomen. Ob izbruhu energijske krize v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja pa se je začel ponoven vzpon izkoriščanja te vrste energije. Proizvodnja električne energije iz kinetične energije vetra se je v zadnjem desetletju podvojila vsaka tri leta.

Problem kinetične energije vetra je njena nestalnost ter njena majhna gostota. Znano je, da je moč sorazmerna tretji potenci hitrosti vetra: podvojitve hitrosti vetra pomeni osemkratno povečanje moči, obenem pa se 10% nihanja hitrosti vetra kaže v 30% nihanju energije [1].

Znano je, da lahko kinetično energijo vetra, ki prehaja skozi vetrno turbino, izkoristimo le z 59,3% izkoristkom. Ta izkoristek, imenovan tudi

#### 0 INTRODUCTION

The exploitation of wind energy goes back at least 3000 years. Until the beginning of modern industrialization, wind and water power represented the most important sources of mechanical energy. The exploitation of fossil fuels, which enabled a more steady source of energy, caused a decline in the use of wind energy. However, the energy crisis of the 1970s caused a renewed interest in using wind energy, and electricity production from wind energy has doubled every three years in the past decade.

The main problem with wind energy proved to be its unsteadiness and its low density. Wind power is proportional to the third power of the wind speed: a doubling of the wind speed results in eight times more power, while at the same time a fluctuation of 10% in the wind speed results in a 30% power fluctuation [1].

It is known that theoretically only 59.3% of the available wind energy that passes through a wind turbine can be used. That efficiency, known as the

aerodinamični izkoristek vetrne turbine ali Betzova meja, je teoretična zgornja meja. Dejanski izkoristki so manjši, vendar se pri sodobnih izvedbah vetrnih turbin približujejo 50%. V obratovanju so vetrne turbine majhnih moči do 20 kW, ki so namenjene posameznim porabnikom, ter vetrne turbine do 4 MW moči, ki so povezane z javnim električnim omrežjem.

Z uvedbo druge stopnje vetrne turbine želimo izkoristiti preostalo kinetično energijo vetra, ki jo prva stopnja turbine ne predela. Izračun dvostopenjske vetrne turbine je predstavljen v [2], pri tem se teoretični aerodinamični izkoristek poveča na 64%. Z nadaljnjim povečevanjem števila stopenj se približujemo mejni vrednosti. Pri neskončnem številu stopenj znaša teoretični izkoristek 66% [3].

#### 1 ENORAZSEŽNI MODEL ENO-IN DVOSTOPENJSKE VETRNE TURBINE

Model enostopenjske vodoravne vetrne turbine propellerskega tipa je bil izdelan na začetku 20. stoletja [5], dvostopenjska vetrna turbina pa je bila matematično obdelana šele v osemdesetih letih prejšnjega stoletja ([2] in [3]).

Oba modela sta enorazsežna in temeljita na naslednjih predpostavkah:

- tok je idealen in nestisljiv,
- hitrost vetra je ustaljena in homogena,
- hitrostno polje je v ravnini prereza vetrne turbine enakomerno,
- ni tokovnih motenj pred vetrno turbino in za njo,
- ni vrtenja toka zaradi vrtenja vetrne turbine,
- vrtenje same vetrne turbine ni upoštevano,
- pri dvostopenjski vetrni turbini ni upoštevan vpliv medsebojne oddaljenosti obeh stopenj.

##### 1.1 Enostopenjska vetrna turbina

Model enostopenjske vetrne turbine prikazuje slika 1. Vetrna turbina je postavljena v "namišljeno tokovno cev", prek katere ni pretoka zraka. Ker je model poznan, so v nadaljevanju napisane le najpomembnejše enačbe, ki so potrebne za razumevanje in so namenjene kot izhodišče za dvostopenjsko vetrno turbino.

Namišljena tokovna cev se razširi od vstopa proti izstopu. Ta razširitev je posledica ohranjanja masnega toka skozi vetrno turbino. Zakon o ohranitvi mase:

Betz limit, represents the theoretical upper limit of the kinetic energy that can be extracted from the wind. Currently, the aerodynamic efficiency of wind turbines in operation is close to 50%. Nowadays, there are wind turbines up to 20 kW, which are intended for individual users, and large wind turbines, 30 kW up to 4 MW, which are connected to the electricity grid.

With the installation of a second stage we want to make use of the energy remaining after stage one. The theoretical approach to a double-stage wind turbine is presented in [2]. With a second stage installation the theoretical aerodynamic efficiency increases up to 64%. In theory, the aerodynamic efficiency of a wind turbine with an infinite number of stages reaches 66% [3].

#### 1 ONE-DIMENSIONAL MODEL OF SINGLE- AND DOUBLE-STAGE WIND TURBINES

The well-known actuator-disc theory for an axial wind turbine was presented at the beginning of the 20<sup>th</sup> century [5]. The double-stage wind turbine was reported in the 1980s, ([2] and [3]).

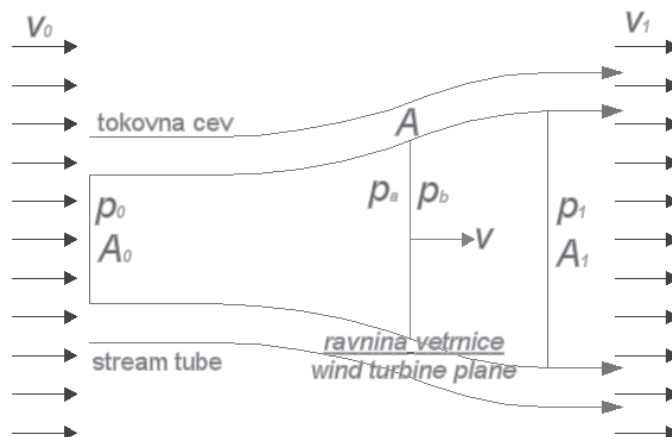
Both models are one-dimensional and are based on the following assumptions:

- the flow is ideal and incompressible,
- the wind speed is uniform and stationary,
- the flow field in the plane of the wind turbine is uniform,
- there is no flow disturbance upstream and downstream of the wind turbine,
- there is flow, with no rotation
- the wind-turbine rotation is neglected,
- the distance between the stages is not considered for a double-stage wind turbine.

##### 1.1 Single-stage wind turbine

The one-dimensional model is presented in Fig.1. The wind turbine is placed in an imaginary stream tube, and there is no airflow over the stream-tube boundaries. The theory of the single-stage wind turbine has been known for 100 years; therefore, only the basic relations of the single-stage model that are needed for a further understanding of the double-stage wind turbine model are presented.

The stream-tube cross-section increased from the inlet towards the outlet region, the extension of the stream tube is a consequence of the mass conservation over the wind turbine. The equation of continuity can be written as follows:



Sl. 1. Model enostopenjske vetrne turbine  
Fig. 1. Single-stage wind-turbine model

$$\rho A_0 v_0 = \rho A v = \rho A_1 v_1 \quad (1).$$

V lopaticah vetrne turbine se kinetična energija zraka spremeni v mehansko delo, hitrost zraka se pri tem zmanjša od  $v_0$  na  $v$ . Sprememba hitrosti je podana s količnikom hitrosti  $a$ :

$$a = \frac{v_0 - v}{v_0} \quad (2)$$

ali v urejeni obliki:

$$v = v_0(1 - a) \quad (3).$$

Sila zaradi razlike hitrosti od začetne pred vetrno turbino  $v_0$  do končne za vetrno turbino  $v_1$  je:

$$F = m(v_0 - v_1) = \rho A v (v_0 - v_1) \quad (4).$$

Ta sila nastane zaradi razlike tlakov pred ravnino vetrne turbine (indeks  $a$ ) in za njo (indeks  $b$ ). Ob predpostavki, da je tokovna cev v celoti obdana z atmosferskim tlakom, zaradi česar je rezultanta sil pred vetrno turbino in za njo enaka nič, dobimo:

$$F = (p_a - p_b) A = \rho A v_0 (v_0 - v_1) (1 - a) \quad (5),$$

$$F = (p_a - p_b) A = \frac{1}{2} \rho A (v_0^2 - v_1^2) \quad (6).$$

Povezava enačb (5) in (6) da hitrost za vetrno turbino:

$$v_1 = v_0 (1 - 2a) \quad (7).$$

On the blades of the wind turbine the kinetic energy is transformed to mechanical energy. This transformation is caused by a velocity reduction from the inflow velocity  $v_0$  to the velocity  $v$ . The reduction of the velocity is expressed by the retardation factor  $a$ :

or in a settled form:

The velocity reduction from the inlet velocity  $v_0$  to the outlet velocity  $v_1$  results in a force:

The acting force is also a consequence of the pressure difference present on the wind turbine's plane. The stream tube is surrounded with atmospheric pressure; therefore, there is no resulting force on the stream tube. From this we have the following:

Combining Equations (5) and (6) gives the downstream velocity:

Teoretična moč vetrne turbine je enaka zmnožku sile  $F$  in hitrosti zraka  $v$  skozi vetrno turbino:

The wind turbine's theoretical power is the product of the force  $F$  and the velocity  $v$  of the air over the wind turbine's plane:

$$P = Fv = \rho Av^2(v_0 - v_1) \quad (8).$$

Povezava enačb (3), (7) in (8) da končni izraz teoretične moči vetrne turbine:

Combining Equations (3), (7) and (8) gives the final expression for the wind turbine's theoretical power:

$$P = 2\rho Av_0^3 a(1-a)^2 \quad (9).$$

Teoretična moč vetrne turbine je enaka tudi razliki kinetičnih energij vetra pred vetrno turbino in za njo:

The theoretical power is also equal to the difference between the upstream and downstream kinetic energy:

$$P = \frac{1}{2} \rho Av(v_0^2 - v_1^2) \quad (10)$$

pri tem je največja teoretična moč vetrne turbine dosežena pri pogoju:  $v_0 = v$  in  $v_1 = 0$ :

The maximum theoretical power is achieved with  $v_0 = v$  and  $v_1 = 0$ :

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho Av_0^3 \quad (11).$$

Aerodinamični izkoristek vetrne turbine je definiran kot razmerje med teoretično močjo in največjo teoretično močjo. Podan je s funkcijo:

The aerodynamic efficiency of a wind turbine is defined as the relation between the theoretical power and the maximum theoretical power:

$$\eta_V(a) = \frac{P}{P_0} = \frac{2\rho Av_0^3 a(1-a)^2}{\frac{1}{2} \rho Av_0^3} = 4a(1-a)^2 \quad (12).$$

Z odvajanjem funkcije, enačba (12), po spremenljivki  $a$  ter izenačenjem odvoda z nič, dobimo:

The differential of function, Equation (12), with respect to  $a$  and setting the derivative equal to zero gives:

$$\frac{d\eta_V(a)}{da} = 4(1-a)^2 - 8a(1-a) = 4(1-a)(1-3a) = 0 \quad (13).$$

Če vstavimo izračunano vrednost za hitrostni količnik  $a$  v enačbo (12), dobimo največji mogoči aerodinamični izkoristek vetrne turbine, imenovan tudi Betzova meja:

By inserting the obtained value for  $a$  into Equation (12), we obtain the maximum aerodynamic efficiency of the wind turbine, known as the Betz limit:

$$\eta_{V_{\max}} \left( \frac{1}{3} \right) = 0,593 \quad (14).$$

Vrednost  $a$  je omejena na območje:

$a$  is limited on the next interval:

$$0 < a < 0,5 \quad (15),$$

saj je pri  $a = 0,5$  hitrost za ravnino vetrne turbine enaka nič, kar je v nasprotju z zakonom o ohranitvi mase.

With  $a = 0.5$  the downstream velocity is equal 0, which is inconsistent with the continuity equation.

## 1.2 Dvostopenjska vetrna turbina

Pri enostopenjski vetrni turbini je optimalna hitrost za turbino enaka tretjini hitrosti pred njo. To pomeni, da je na voljo še nekaj kinetične energije vetra, ki bi jo bilo mogoče izkoristiti v naslednji stopnji. Druga turbinska stopnja je postavljena v osi za prvo, vendar oddaljena toliko, da je tok zraka v drugo stopnjo nemoten, kakor je prikazano na sliki 2. To omogoča ponovitev izračuna kakor je bil izveden za prvo stopnjo. Velikost druge stopnje vetrne turbine je enaka prvi stopnji, kar v splošnem ni nujno.

Analizo dvostopenjske vetrne turbine lahko obravnavamo z metodo superpozicije. Model razbijemo na dva dela in ju obravnavamo ločeno, na koncu pa zopet združimo. Pri dovolj veliki oddaljenosti med stopnjama je izstopna hitrost zraka iz prve stopnje enaka vstopni hitrosti v drugo stopnjo:

$$v_1 = v_{02} = v_0(1 - 2a) \quad (16).$$

Hitrost v ravnini druge stopnje vetrne turbine se zmanjša za hitrostni količnik  $b$ , ki v splošnem ni enak hitrostnemu količniku  $a$  prve stopnje:

$$b = \frac{v_{02} - v_2}{v_{02}} \quad (17)$$

ali v urejeni obliki:

$$v_2 = v_{02}(1 - b) \quad (18).$$

Hitrost za drugo stopnjo vetrne turbine je:

$$v_{12} = v_{02}(1 - 2b) \quad (19).$$

Teoretična moč druge stopnje je enaka zmnožku sile  $F_2$  in hitrosti pretoka zraka skozi drugo stopnjo  $v_2$ :

$$P_2 = F_2 v_2 = \rho A_2 v_2^2 (v_{02} - v_{12}) \quad (20).$$

Povezava enačb (16), (19) in (20) da:

$$P_2 = 2\rho A_2 v_{02}^3 b(1 - b)^2 = 2\rho A_2 v_0^3 (1 - 2a)^3 b(1 - b)^2 \quad (21).$$

Tudi za drugo stopnjo velja, da je teoretična moč enaka razliki kinetičnih energij vetra pred vetrno turbino in za njo:

$$P_2 = \frac{1}{2} \rho A_2 v_2 (v_{02}^2 - v_{12}^2) \quad (22),$$

## 2.1 Double-stage wind turbine

For a single-stage wind turbine the downstream velocity is equal to 1/3 of the upstream velocity, which means that some of the remaining energy could be used in the next stage. The second stage is placed in the flow field behind the first stage, where the flow field is undisturbed, as shown in Fig. 2. This allows us to reuse the relations of the single-stage model. This is not consistent with the real conditions; in reality, both stages are close together. The second stage's cross-section is equal to the first stage's cross-section, but in general this is not necessarily the case.

In an analysis of a double-stage turbine it is assumed that every stage is analyzed separately and at the end both parts are merged together. With the distance between the stages large enough, the inflow velocity of the second stage is equal to the outflow velocity of the first stage:

The velocity over the second stage's plane is reduced by a retardation factor  $b$ , which is not necessarily equal to the first stage's retardation factor  $a$ :

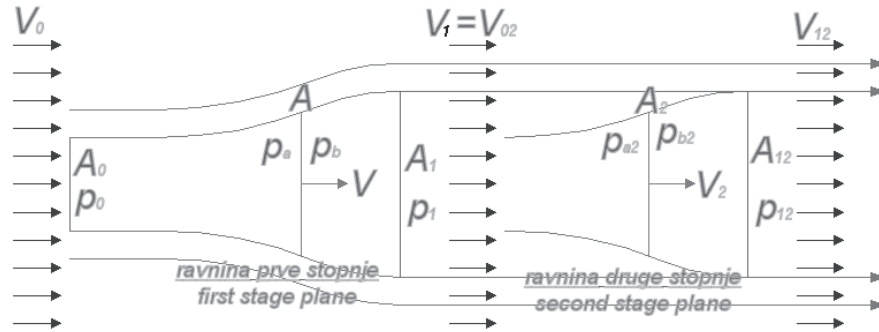
Or in a settled form:

The second-stage downstream velocity is:

The second stage's theoretical power is a product of the force  $F_2$  and the velocity  $v_2$  over the second stage's plane:

Combining Equations (16), (19) and (20) gives:

The second stage's theoretical power can be expressed as a kinetic energy difference:



Sl. 2. Model dvostopenjske vetrne turbine

Fig. 2. Double-stage wind-turbine model

pri tem je največja teoretična moč druge stopnje dosežena pri pogoju:  $v_{02} = v_2$  in  $v_{12} = 0$ :

The theoretical maximum second-stage power assumes  $v_{02} = v_2$  and  $v_{12} = 0$ :

$$P_{02} = 2\rho A_2 v_{02}^3 \quad (23).$$

Aerodinamični izkoristek druge stopnje je definiran enako kakor izkoristek prve stopnje:

The second-stage aerodynamic efficiency is defined as follows:

$$\eta_{v_2}(b) = \frac{P_2}{P_{02}} = \frac{\frac{1}{2} \rho A v_{02}^3 4b(1-b)^2}{\frac{1}{2} A_2 \rho v_{02}^3} = 4b(1-b)^2 \quad (24).$$

Z odvajanjem funkcije, enačba (24) po spremenljivki  $b$ , ter izenačenjem odvoda z nič dobimo enačbo, ki je podobna enačbi (13). Tudi za drugo stopnjo velja Betzova meja:

Differentiating the of function, Equation (24), with respect to  $b$  and setting the derivative equal to zero gives an equation similar to Equation (12). The Betz limit is also valid for the second stage:

$$\eta_{v_{2max}}(b) = 0,593 \quad (25)$$

in omejitev

And the limitation

$$0 < b < 0,5 \quad (26).$$

Površina dvostopenjske vetrne turbine je enaka največji skupni površini obeh stopenj. Glede na to lahko zapišemo največjo teoretično moč:

The cross-section of the double-stage wind turbine is equal to the largest area of both stages. The maximum theoretical power can be written as follows:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho (A, A_2)_{\max} v_0^3 \quad (27).$$

Skupni aerodinamični izkoristek dvostopenjske vetrne turbine, enačbe (9), (21) in (27), je podan z enačbo:

The double-stage wind turbine's total aerodynamic efficiency, Equations (9), (21) and (27), is as follows:

$$\eta_{v_{tot}}(a, b) = \frac{P + P_2}{P_0} = \frac{\frac{1}{2} \rho A v_0^3 4a(1-a)^2 + \frac{1}{2} A_2 v_0^3 (1-2a)^3 4b(1-b)^2}{\frac{1}{2} \rho (A, A_2)_{\max} v_0^3} \quad (28).$$

S preureditvijo dobi enačba (28) končno obliko:

By manipulating Equation (28) we get:



$$\eta_{V_{tot}}(a,b) = \frac{1}{(A, A_2)_{\max}} = \left[ 4Aa(1-a)^2 + 4A_2(1-2a)^3 b(1-b)^3 \right] \quad (29).$$

Aerodinamični izkoristek  $\eta_{V_{tot}}$  je odvisen od obeh hitrostnih količnikov ( $a, b$ ) ter premera posamezne stopnje.

Za nadaljevanje je treba analizirati vpliv velikosti vetrne turbine na izkoristek  $\eta_{V_{tot}}$ .

$A_2 > A$  izraz  $(A, A_2)_{\max}$  je enak  $A_2$ . To ima za posledico povečanje  $P_0$  in  $P_2$ . Povečanje  $P_0$  pa je večje od prispevka drugega člena enačb (29) k skupni moči. Tako je skupni izkoristek manjši.

$A > A_2$  izraz  $(A, A_2)_{\max}$  je enak  $A$ . V tem primeru se povečata  $P_0$  in  $P$ . Povečuje se prvi člen enačbe (29), ki prispeva največ k skupni moči, drugi pa se zmanjšuje. Tako je skupni izkoristek zopet manjši.

$A = A_2$ , v tem primeru je aerodinamični izkoristek dvostopenjske vetrne turbine največji.

Enačba (29) je zvezna dvoparametrična funkcija. Za izračun optimuma funkcije je treba izračunati odvod funkcije po obeh spremenljivkah, tako po hitrostnem količniku  $a$  kakor hitrostnem količniku  $b$ :

$$\frac{\partial \eta_{V_{tot}}(a,b)}{\partial a} = \frac{4A}{(A, A_2)_{\max}} \left[ (1-a)^2 - 2a(1-a)^2 \right] - \frac{24A_2(1-b)^2}{(A, A_2)_{\max}} (1-2a)^3 \quad (30)$$

ter

and

$$\frac{\partial \eta_{V_{tot}}(a,b)}{\partial b} = \frac{4A_2}{(A, A_2)_{\max}} (1-2a)^3 \left[ (1-b)^2 - 2b(1-b) \right] \quad (31).$$

Ob upoštevanju  $A = A_2$  ter z izenačitvijo odvodov z nič, preideta enačbi (30) in (31) v obliko:

$$\frac{\partial \eta_{V_{tot}}(a,b)}{\partial a} = 4(1-a)^2 - 8a(1-a)^2 - 24(1-b)^2(1-2a)^3 = 0 \quad (32)$$

ter

and

$$\frac{\partial \eta_{V_{tot}}(a,b)}{\partial b} = 4(1-2a)^3 \left[ (1-b)^2 - 2b(1-b) \right] = 0 \quad (33).$$

Rešitev enačb (32) in (33) da optimalni vrednosti hitrostnih količnikov:

$$a_{opt} = \frac{1}{5} \quad \text{ter/and} \quad b_{opt} = \frac{1}{3} \quad (34).$$

Pri optimalnih vrednostih obeh količnikov doseže izkoristek po enačbi (29) največjo vrednost:

$$\eta_{V_{opt}}\left(\frac{1}{5}, \frac{1}{3}\right) = \frac{16}{25} = 0,64 \quad (35).$$

The total aerodynamic efficiency  $\eta_{V_{tot}}$  is dependent on both the retardation factors ( $a, b$ ) and the stage diameters.

For a further analysis the effect of the stage diameter on the total aerodynamic efficiency  $\eta_{V_{tot}}$  has to be determined.

$A_2 > A$ , the expression  $(A, A_2)_{\max}$  is equal to  $A_2$ . Consequently, the maximum theoretical power  $P_0$  and the second-stage power  $P_2$  both increase. The increase of  $P_0$  is greater than the second-stage contribution and hence the efficiency is smaller.

$A > A_2$ , The expression  $(A, A_2)_{\max}$  is equal to  $A$ . The available power  $P_0$  increases again, but consistently the power in the first stage also increases, which contributes most to the total power. The extracted power in the second stage falls, so the efficiency drops again.

$A = A_2$ , The double-stage wind turbine's total aerodynamic efficiency reaches its maximum value.

Equation (29) is a function of the two variables. To obtain an optimum, a partial derivative with respect to both variables, the retardation factors  $a$  and  $b$ , has to be performed:

Considering  $A = A_2$  and setting both derivatives equal to zero, the final form of Equations (30) and (31) is obtained:

By solving the Equations (32) and (33) the optimum values for both retardation factors are obtained:

The two values give the maximum of Equation (31), which is:

Enak rezultat za teoretični aerodinamični izkoristek so predstavili tu drugi avtorji v [2] in [3], vendar z drugačnim postopkom.

Enorazsežna modela za eno- in dvostopenjsko vetrno turbino dasta informacijo o hitrosti za vetrno turbino,  $v_1$ , v delu, kjer se namišljena tokovna cev razširi. V primeru enostopenjske turbine znaša hitrost za vetrno turbino po enačbi (7) v optimalni točki tretjino vstopne hitrosti  $v_0$ . V primeru dvostopenjske vetrne turbine, pri kateri je dobljena večja teoretična moč vetrne turbine ter s tem večji aerodinamični izkoristek, mora biti hitrost v delu za drugo stopnjo še nekoliko manjša. S kombinacijo enačb (16), (19), ter (34) dobimo hitrost za drugo stopnjo dvostopenjske vetrne turbine v optimalni točki in znaša petino vstopne hitrosti  $v_0$ .

## 2 NUMERIČNA ANALIZA ENO IN DVOSTOPENJSKE VETRNE TURBINE

Za izračun je uporabljen paket za numerično modeliranje tokov CFX 5.6. Tehnični podatki o vetrni turbini so zbrani v preglednici 1 in 2.

Preglednica 1. Tehnični podatki modela  
Table 1. Model technical data

$R$	400	mm
$N$	5	-
$\lambda$	6	-

Premer  $R$  vetrne turbine in število lopat  $N$  sta enaka za enostopenjsko in dvostopenjsko izvedbo. Geometrijska oblika lopate vetrne turbine pa je določena s hitrostrnim številom  $\lambda$ , ki je podano z enačbo:

$$\lambda = \frac{R\omega}{v_0} \quad (36).$$

Preglednica 2. Robni pogoji modela  
Table 2. Model boundary conditions

$v_0$	6	m/s
$\rho$	1,164	kg/m <sup>3</sup>
$\nu$	$1,824 \times 10^{-5}$	Ns/m <sup>2</sup>

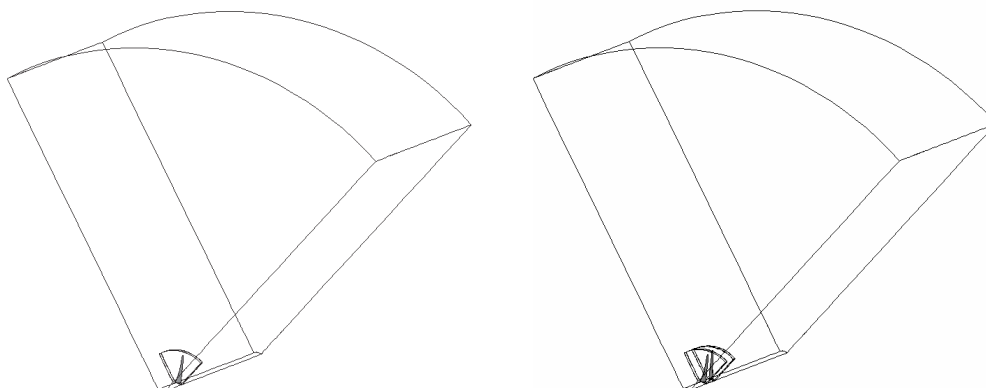
The result obtained is the same as in [2] and [3], but uses a different approach.

One-dimensional models of single- and double-stage wind turbines provide information about the velocity behind the wind turbine,  $v_1$ , in the part where the imaginary stream-tube cross-section increases. In the case of a single-stage wind turbine the downstream velocity at the optimum point is equal to 1/3 of the upstream velocity  $v_0$ . In the case of a double-stage wind turbine, which has a higher theoretical power and consequently a higher aerodynamic efficiency, an even lower downstream velocity is expected. Combining Equations (16), (19) and (34) gives the downstream velocity at the optimum operating point of the double-stage wind turbine, which is 1/5 of the upstream velocity  $v_0$ .

## 2 NUMERICAL ANALYSIS OF SINGLE- AND DOUBLE-STAGE WIND TURBINES

The numerical analysis was made with CFX 5.6 software. The technical model data are given in Table 1 and Table 2.

Rotor radius and the number of rotor blades were equal in both cases. The tip speed ratio  $\lambda$  is a dimensionless number that defines the geometry of the wind-turbine blades:



Sl. 3. Geometrijsko topološki model eno- (levo) in dvostopenjske (desno) vetrne turbine  
 Fig. 3. Geometrical and topological models of single- (left) and double-stage (right) wind turbines

Preglednica 3. Število elementov ter vozlišč računske mreže  
 Table3. Number of mesh nodes and elements

$n$	Okolica – Surrounding	Rotor – Rotor
	Elementov – Elements / Vozlišč – Nodes	Elementov Elements / Vozlišč Nodes
1	120959/112140	121848/113370
2	137228/126756	121848/113370

Delovna snov je zrak pri 20°C in atmosferskem tlaku z nespremenljivo hitrostjo  $v_0$ . Spreminjajoč parameter je predstavljala kotna hitrost vetrne turbine  $\omega$ .

Za modeliranje turbulence je bil uporabljen turbulentni model TSN (transport strižnih napetosti). Konvergenčni kriterij, ki mora zadostovati za zaključek izračuna, je podan z največjo dopustno napako  $10^{-4}$ .

Geometrijsko topološki model enojne in dvojne izvedbe vetrne turbine je prikazan na sliki 3.

V obeh primerih je bila modelirana po ena lopata, torej krožni izsek  $72^\circ$ . Pri tem zajema okolica desetkratni polmer vetrne turbine. Pri eno- in dvostopenjski vetrni turbini je za vse dele opazovane prostornine uporabljena nestrukturirana šesterokotna mreža. Število vozlišč in elementov v posameznem delu računske mreže je podano v preglednici 3. V obeh primerih imata rotorja enako število vozlišč in elementov. V primeru okolice pa je število vozlišč ter elementov zaradi modeliranja razdalje med stopnjama nekoliko večje pri dvostopenjski vetrni turbini.

Slika 4 prikazuje porazdelitev tlakov pri eno- in dvostopenjski vetrni turbini. Iz porazdelitve je

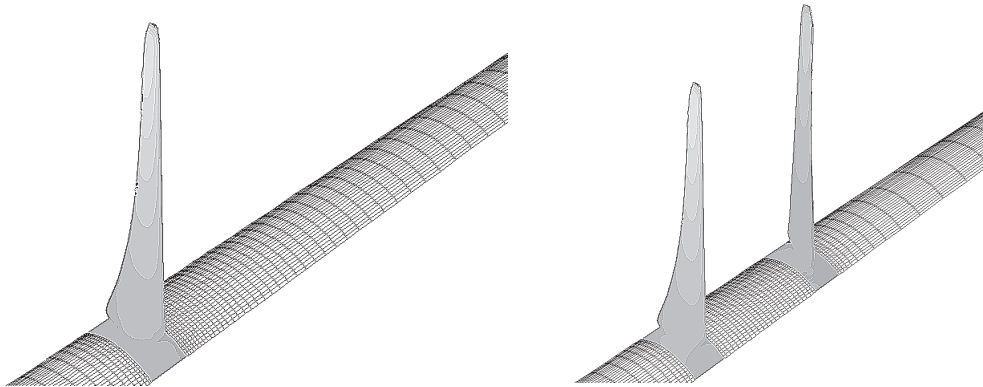
The working fluid is air at 20°C and atmospheric pressure with a constant inflow velocity  $v_0$ . The varying parameter was the wind turbine's angular velocity  $\omega$ .

The turbulence was modeled with the turbulent model SST (Shear Stress Transport). The convergence criterion was set to  $10^{-4}$  for maximum error.

The geometrical and topological models of the single- and the double-stage wind turbines are shown in Fig. 3.

Only one blade was modeled in both examples, representing  $72^\circ$  of the whole turbine. The turbine surrounding was ten times the rotor radius. An unstructured hexagonal mesh was used in both cases. The number of nodes and elements are given in Table 3. The rotor had the same number of nodes and elements in both examples. The surroundings had more nodes and elements in the case of the double-stage model due to the space between the stages.

Fig. 4 shows the pressure distribution on the turbine blades. There is almost no second-stage



Sl. 4. Razporeditev tlakov na lopatici eno- in dvostopenjske vetrne turbine v optimalni obratovalni točki  
 Fig. 4. Static pressure distribution on the wing of the single- (left) and double-stage (right) wind turbine at the optimal operating point

Preglednica 4. Kotne hitrosti pri dvostopenjski vetrni turbini

Table 4. Double-stage angular velocities

$\omega$ (s <sup>-1</sup> )	75				90				105			
$\omega_2$ (s <sup>-1</sup> )	50	60	70	80	50	60	70	80	40	50	60	70

razvidno, da je medsebojni vpliv stopenj na tlačno porazdelitev na lopaticah najmanjši, saj se tako pri enojni kakor pri dvojni izvedbi porazdelitev statičnega tlaka na prvi stopnji skoraj ne razlikujeta.

Numerični izračun aerodinamičnega izkoristka je bil najprej izveden za enostopenjsko vetrno turbino, pri tem je bila kotna hitrost rotorja spreminjana od 60 do 120 s<sup>-1</sup>. Izračun dvostopenjske vetrne turbine pa je izveden tako, da se prva stopnja vrti s stalno kotno hitrostjo  $\omega$ , kotna hitrost druge stopnje  $\omega_2$  pa se spreminja, tako da je tudi v drugi stopnji dosežen optimum. Kombinacije kotnih hitrosti so zbrane v preglednici 4.

Rezultati simulacije so predstavljeni na sliki 5, na kateri je predstavljen tudi skupni aerodinamični izkoristek. Izračunani optimalni izkoristek enostopenjske vetrne turbine je 0,453. Z vgradnjo druge stopnje vetrne turbine, ki se vrti v obratni smeri, se ta izkoristek poveča na 0,517. Povečanje izkoristka gre na račun izrabe preostale kinetične energije vetra ter vpliva interakcije med obema rotorjema. Poleg navedenega povečuje vgradnja druge stopnje tudi relativno kotno hitrost med stopnjama.

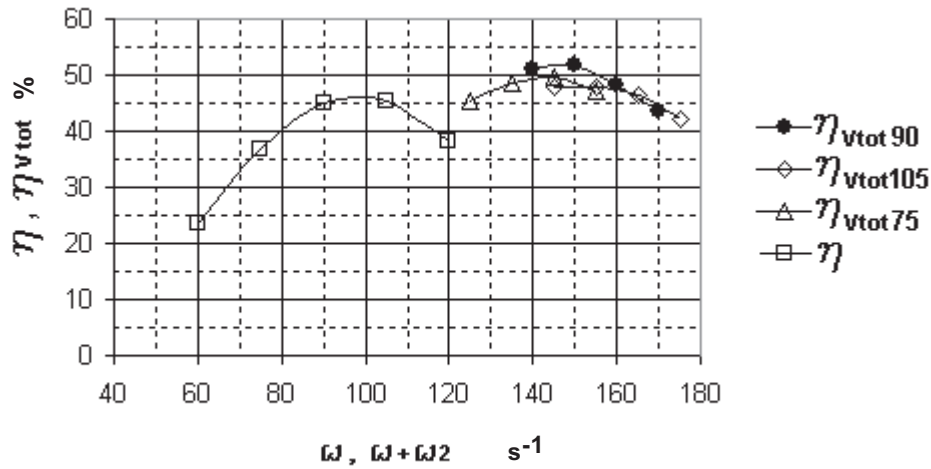
Na sliki 6 so prikazani vektorji vzdolžnih hitrosti za obema izvedbama vetrne turbine. Razvidno je, da so hitrosti v primeru dvostopenjske izvedbe manjše, kar kaže na dodatno spremembo energije

feedback influence on the first stage. This can be concluded from the almost identical static pressure distribution on the first-stage blade in both models.

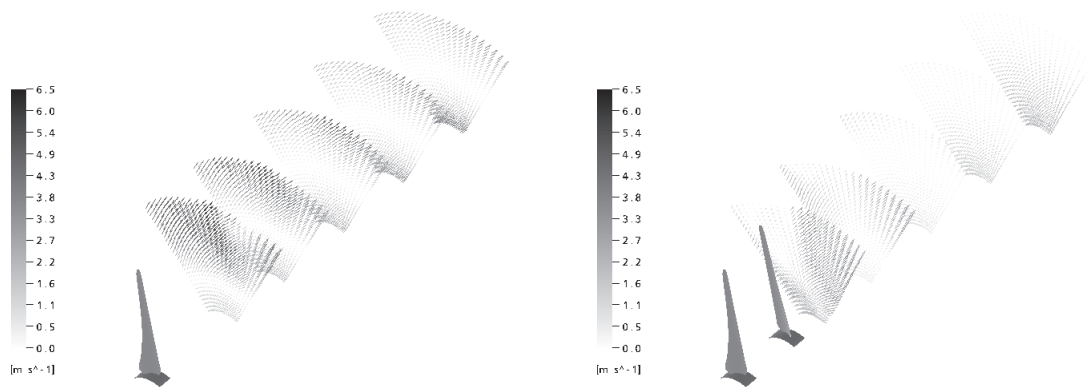
The aerodynamic efficiency was first calculated for the single-stage model. The varying parameter was the angular velocity, in the range from 60 to 120 s<sup>-1</sup>. The simulation of the double-stage model was made with a constant first-stage angular velocity  $\omega$ , while varying the second  $\omega_2$  until the second-stage optimum operating point was obtained.

The simulation results are presented in Fig. 5. The aerodynamic efficiency characteristic is presented for single- and double-stage models. The maximum calculated aerodynamic efficiency for a single-stage model is 0.453. With the installation of a second counter-rotating stage the maximum aerodynamic efficiency rises to 0.517. The second stage uses some of the kinetic energy left over from the first stage and so the total aerodynamic efficiency is increased. The installation of a second counter-rotating stage has the additional benefit of increasing the wind turbine's relative angular velocity (Fig. 5).

Fig. 6 shows the axial velocity vectors behind both wind turbines. It is evident that the axial velocity behind the double-stage wind turbine is smaller than the axial velocity behind the single-stage model, which indicates an additional energy



Sl. 5. Aerodinamični izkoristek eno- in dvostopenjske vetrne turbine  
 Fig. 5. Aerodynamic efficiency characteristics of single- and double-stage wind turbines



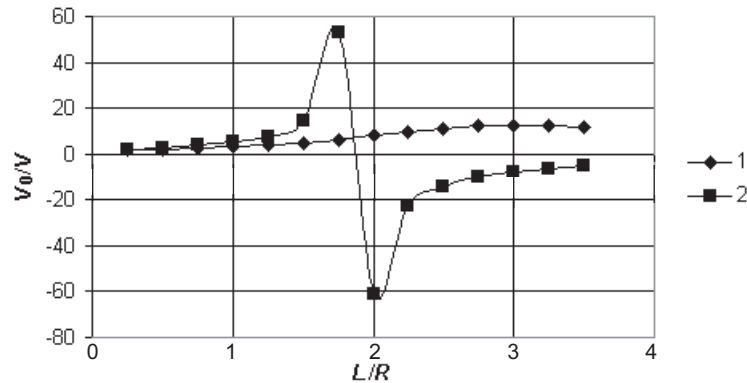
Sl. 6. Vz dolžna hitrost za enostopenjsko (levo) in dvostopenjsko (desno) vetrno turbino.  
 Fig. 6. Axial velocity behind a one-stage (left) and two-stage (right) wind turbine

vetra v drugi stopnji vetrne turbine. Ocena zmanjšanja hitrosti za obema izvedbama vetrne turbine v optimalni točki je prikazana na sliki 7.

Prikazana je odvisnost površinsko povprečne vzdolžne hitrosti (normirane na  $v_0$ ), na enakih prerezih vzdolž okolice, od oddaljenosti od stopnje za vetrno turbino (normirane na polmer vetrne turbine  $R$ ). Prerezi so pri obeh izvedbah vetrne turbine enaki, in sicer zajemajo površino krožnega izseka s polmerom vetrne turbine ( $R = 400 \text{ mm}$ ). Iz analize tokovnega polja z obema izvedbama vetrne turbine, slika 6 in 7, izhaja, da pride v primeru dvostopenjske vetrne turbine do občutnega zmanjšanja vzdolžnih hitrosti, kar kaže na večjo izrabo kinetične energije vetra in s tem na večji aerodinamični izkoristek

transformation in the second stage. Quantitative results of the velocity reduction behind both wind turbine models at the optimum operating point are shown in Fig 7.

Fig. 7 shows the area-averaged axial velocity (normalised to  $v_0$ ) depending on the distance behind the wind-turbine stage (normalised to the wind-turbine radius  $R$ ). The average cross-sectional areas are equal in both models, they capture an area equal to the circular section area with the wind-turbine radius ( $R = 400 \text{ mm}$ ). The velocity field analysis behind both models shows, Fig. 6 and Fig. 7, a significant axial velocity reduction that occurs in the case of the double-stage model, which points to greater usage of the wind's kinetic energy and



Sl. 7. Zmanjšanja hitrosti za vetrno turbino  
Fig. 7. Velocity reduction behind a wind turbine

dvostopenjske vetrne turbine. V primeru dvostopenjske vetrne turbine je zmanjšanje hitrosti tolikšno, da pride do povratnih tokov, vrtnčenja, za vetrno turbino, kar je razvidno s slike 7, razmerje  $v_0/v$  na določenem mestu spremeni predznak.

### 3 SKLEPI

Raziskana je bila eno- in dvostopenjska vetrna turbina z nasprotno vrtečima se rotorjema.

Enostopenjska izvedba doseže teoretično največji aerodinamični izkoristek  $16/27 = 0,593$  (Betzova meja), medtem ko doseže dvostopenjska izvedba v teoriji največji skupni izkoristek  $16/25 = 0,64$ .

Izvedena je bila numerična analiza eno- in dvostopenjske vetrne turbine, pri čemer je bila razdalja med obema stopnjama manjša od zahteve pri teoretičnem izračunu, pri katerem je predpostavljen nemoten tok zraka iz prve v drugo stopnjo.

Izračunan je bil aerodinamični izkoristek 0,453 pri enostopenjski izvedbi in 0,517 pri dvostopenjski. Povečanje skupnega izkoristka dvostopenjske vetrne turbine gre na račun izrabe preostale kinetične energije vetra za prvo stopnjo.

Nadaljnje raziskovalno delo bo usmerjeno v eksperimentalno preverjanje dobljenih rezultatov numeričnega modela in eksperimentalno-parametrično analizo geometrijskih in kinematskih parametrov dvostopenjske vetrne turbine.

consequently to a higher aerodynamic efficiency. In the case of a double-stage wind turbine the velocity reduction is so high that back flow occurs, as shown in Fig. 7, where the relation  $v_0/v$  at a certain point changes from a positive to a negative value.

### 3 CONCLUSIONS

Single- and double-stage counter-rotating wind turbines were investigated.

In theory a single-stage wind turbine has a maximum aerodynamic efficiency of  $16/27 = 0.593$  (the Betz limit). A double-stage wind turbine has a maximum aerodynamic efficiency of  $16/25 = 0.64$ .

A numerical analysis of both modes was performed. In the theoretical model an undisturbed flow between the stages was assumed. In the numerical double stage the model distance between the stages was smaller than theoretically demanded.

Numerical results show an aerodynamic efficiency of 0.453 in the single-stage model and 0.517 in the double-stage model. The increase in the aerodynamic efficiency in the double-stage model is a consequence of the additional power extraction from the wind's kinetic energy behind the first stage.

Further investigations will include an experimental confirmation of the numerical results and an experimental-parametric analysis of the geometric and kinematic parameters of a double-stage counter-rotating wind-turbine model.



4 OZNAKE  
4 SYMBOLS

prerez vetrne turbine	$A$	$m^2$	wind-turbine cross-section
hitrostni količnik prve stopnje	$a$	-	first-stage retardation factor
hitrostni količnik druge stopnje	$b$	-	second-stage retardation factor
sila	$F$	N	force
razdalja, oddaljenost	$L$	m	distance
število lopat	$N$	-	number of blades
število stopenj	$n$		number of stages
moč	$P$	W	power
tlak	$p$	Pa	pressure
polmer vetrne turbine	$R$	m	wind-turbine radius
hitrost	$v$	m/s	velocity
izkoristek	$\eta$	-	efficiency
hitrostno število	$\lambda$	-	tip-speed ratio
gostota zraka	$\rho$	$kg/m^3$	air density
kinematična viskoznost	$\nu$	$Ns/m^2$	kinematic viscosity
kotna hitrost	$\omega$	1/s	angular velocity

**Indeksi**

tik pred vetrno turbino  
tik za vetrno turbino  
največji  
med stopnjama  
skupni  
pred vetrno turbino  
za vetrno turbino  
druga stopnja

a  
b  
max  
s  
tot  
0  
1  
2

**Indexes**

just in front of the wind turbine  
just behind the wind turbine  
maximum  
between stages  
total  
in front of the wind turbine  
behind the wind turbine  
stage two

5 LITERATURA  
5 REFERENCES

- [1] Ackerman, T., L. Soder (2002) An overview of wind energy status 2002, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 67-128, June 2002.
- [2] Neman, B.G. (1983) Actuator-disc theory for vertical-axis wind turbine, *Journal of Wind Energy And Industrial Aerodynamics*, Volume 15, Issue 1-3, 347-355, December 1983.
- [3] Neman, B.G. (1986) Multiple actuator-disc theory for wind turbines, *Journal of Wind Energy And Industrial Aerodynamics*, Volume 24, Issue 3, 347-355, October 1986.
- [4] Izumi Ushiyama, Toshihiko Shimota, Yukihiro Miura (1996) An experimental study of the two staged wind turbines, *Renewable Energy*, Volume 9, Issue 1-4, 909-912, September-December 1996.
- [5] Burton, T., D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi (2001) Wind energy (handbook), *John Willey & Sons Ltd*, England.

Naslova avtorjev: Vlado Schweiger  
Turboinštitut  
Rovšnikova 6  
1000 Ljubljana  
vlado.schweiger@turboinstitut.si

prof.dr. Brane Širok  
prof.dr. Matija Tuma  
Niko Mihelič  
Fakulteta za strojništvo  
Univerze v Ljubljani  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana  
brane.sirok@fs.uni-lj.si  
matija.tuma@fs.uni-lj.si

Authors' Addresses: Vlado Schweiger  
Turboinštitut  
Rovšnikova 6  
1000 Ljubljana, Slovenia  
vlado.schweiger@turboinstitut.si

Prof.Dr. Brane Širok  
Prof.Dr. Matija Tuma  
Niko Mihelič  
Faculty of Mech. Eng.  
University of Ljubljana  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana, Slovenia  
brane.sirok@fs.uni-lj.si  
matija.tuma@fs.uni-lj.si

Prejeto: 24.5.2004  
Received:

Sprejeto: 2.12.2004  
Accepted:

Odperto za diskusijo: 1 leto  
Open for discussion: 1 year

## Uporabnost obdelave z abrazivnim vodnim curkom v orodjarstvu

### The Versatility of Abrasive Water-Jet Machining in the Toolmaking Industry

Boštjan Juriševič - Davorin Kramar - Mihael Junkar

*Obdelava z abrazivnim vodnim curkom (AVC) je neobičajni postopek, ki temelji na odnašanju materiala obdelovanca kot posledice erozije trdih abrazivnih delcev, pospešenih z vodnim curkom velikih hitrosti. Prednost AVC pred drugimi odrezovalnimi postopki je v zmožnosti obdelave praktično kateregakoli materiala in zanemarljivi toplotno prizadeti coni v obdelovancu. Poleg tega je obdelava z AVC ekološko zelo sprejemljiva, saj uporablja le vodo in naravne abrazive. Področje uporabe AVC sega od čiščenja in utrjevanja površin, kjer se večinoma uporablja le vodni curek (VC), obrisnega rezanja, teksturiranja, frezanja pa vse do preoblikovanja in uporabe v medicini. Razvoj tehnologije z namenom povečati natančnost obdelave gre v smeri uporabe višjih tlakov ter manjših premerov curkov in finejših abrazivov, kar bi odprlo številne možnosti na področju mikro obdelave. V prispevku so opisane najnovejše raziskave s področja obdelave z AVC in VC, pri katerih je bil Laboratorij za alternativne tehnologije (LAT) dejavno udeležen.*

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: orodjarstvo, obdelave s curkom, curek vodni, curek abrazivni)**

*Abrasive water jet (AWJ) is a non-conventional machining process in which the material-removal process in the workpiece takes place as a result of the erosion caused by high-speed abrasive particles. Several characteristics, like the ability to machine practically any known material and the absence of any relevant heat-affected zone (HAZ), make the AWJ process highly competitive, especially in the case of hard-to-machine materials. The process is environmentally acceptable, since only water and natural abrasives are used. The range of applications is wide: from cleaning and surface preparation to cutting, deep-hole drilling, turning and milling. Since its introduction, a wide range of applications and new opportunities (medicine, forming) are showing all the potentials of this technology. This contribution aims to present the latest research in the field of AWJ and WJ implementation in the toolmaking industry that have been tested and researched at the Laboratory for Alternative Technologies (LAT).*

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: toolmaking, machining processes, abrasive water jets)**

#### 0 UVOD

Obdelava z AVC spada v široko skupino postopkov, pri katerih je orodje curek z velikimi hitrostmi. Poleg obdelave z AVC je zelo razširjena obdelava z VC, ki se uporablja za čiščenje, obdelavo in utrjevanje površin, preoblikovanje, rezanje mehkejših materialov, kot podpora pri običajnih odrezovalnih postopkih, recikliranju ter nenazadnje v medicinskih uporabah. Obdelava z abrazivnim curkom (AC), pri katerih so abrazivni delci pospešeni s tokom zraka z velikimi hitrostmi, se večinoma uporablja za obdelavo površin

#### 0 INTRODUCTION

AWJ belongs to a wide group of machining processes, but unlike traditional, rigid machining tools, the tool is a high-speed jet of water. Besides AWJ, which is mostly used for cutting, the WJ process has a dominant role in the field of cleaning, surface preparation and hardening, forming, cutting of softer materials, assisting to conventional cutting processes, recycling and medical applications. Another process from this group is abrasive jet machining (AJM), where a high-speed air jet accelerates the abrasive particles. This process is mostly used for surface treatments like cleaning, engraving, tex-

(čiščenje, teksturiranje, graviranje, poliranje). Skupne lastnosti obdelav s curkom z velikimi hitrostmi so velika koncentracija energije, odsotnost toplotno prizadete cone v obdelovancu ter majhne sile na njem. Vsi navedeni postopki so mehanski, orodje (curek) pa se neprestano obnavlja.

Za obdelavo trših materialov, uporabljenih v orodjarstvu je najbolj primerna obdelava z AVC, kateri bo v nadaljevanju posvečene največ pozornosti. Po kratkem pregledu razvoja postopka obdelave z AVC so v nadaljevanju predstavljena osnovna načela delovanja. Sledi pregled področja uporab ter smeri nadaljnjega razvoja tehnologije. Na koncu so podani sklepi z razpravo o možnostih uporabe postopka predvsem na področju orodjarstva.

Namen predstavljenega prispevka je prikazati možnosti za uporabo AVC in VC na področju orodjarstva, ne le pri izdelavi orodij, ampak tudi pri načrtovanju tehnologije preoblikovanja. Izkazalo se je, da se lahko predstavljena tehnologija uporabi pri izdelavi prototipov pri preoblikovanju pločevine, čemur bo posvečena posebna pozornost.

## 1 RAZVOJ POSTOPKA

Postopek obdelave z AVC je bil razvit v zgodnjih osemdesetih letih prejšnjega stoletja iz postopka obdelave z VC. Izkazalo se je, da lahko curek pare ali stisnjene zraka pri poškodbah napeljav prereže leseno palico [1] ter da vodne kapljice lahko poškodujejo površino kril na letalu [2], kar je privedlo do prve uporabe VC v industrijske namene [3]. Dejansko pa prve uporabe VC v rudarstvu segajo na začetek 20. stoletja [4]. Leta 1983 je bil izdelan in patentiran prvi tržni sistem za obdelavo z AVC [5], kjer so z dodajanjem abrazivnih delcev v VC omogočili obdelavo praktično vseh materialov.

Od takrat je razvoj postopka obdelave z AVC hitro napredoval in je dandanes eden izmed najobetavnejših. Leto kasneje je bil razvit prvi suspenzijski sistem, ki se zaradi velike stopnje obrabe komponent in počasnih odzivnih časov kjub številnim prednostim (večja energijska učinkovitost, kakovostnejša obdelava, nižji tlaki vode itn.), ni uveljavil v praksi. Slika 1 prikazuje razvoj obdelave z AVC.

turing, and polishing. A common feature of all these jet-based processes is a high energy concentration, small forces on the workpiece and the absence of a relevant HAZ. All these processes are mechanical, and the tool (a high-speed jet) is self renewing during whole of the machining process.

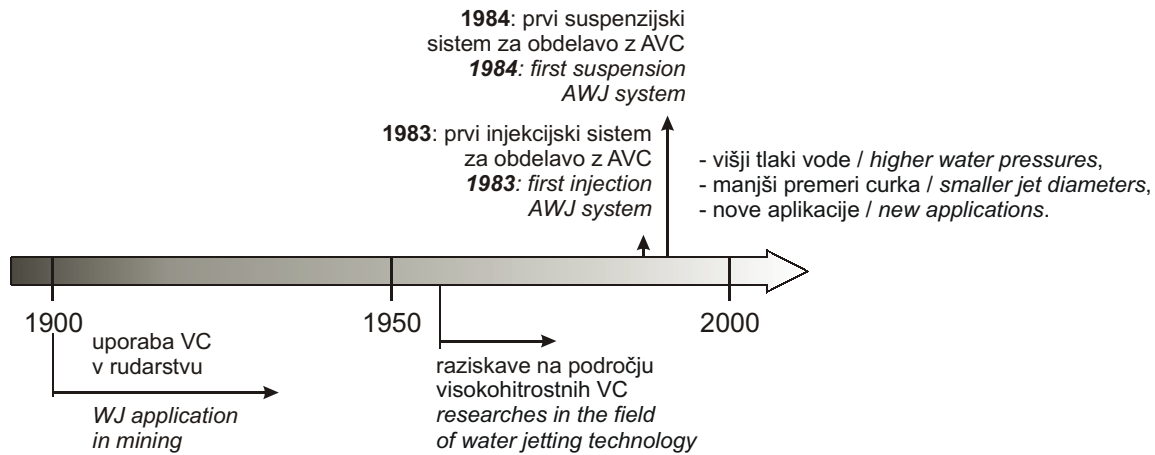
For hard-to-machine materials, as is the case in toolmaking, the AWJ machining process is very appropriate, and will be explained in more details in the following sections. A short overview of the AWJ process will be given, and its working principles will be explained. After a short preview of the applications, and predictions of the further developments and expectations of high-speed jet technology, special attention will be given to the fields of AWJ 3D machining and WJ incremental-forming investigations, which have been performed in our laboratory. Finally, the role of both AWJ and WJ machining process in the toolmaking industry will be described.

The objective of this contribution is not only to show the possibilities of AWJ and WJ machining for tool and die production, but also to point out the possibilities of using this technology in technology planning, such as in the case of sheet-metal forming. An emerging application is WJ incremental sheet-metal forming, which can be used for prototype and small-batch production.

## 1 DEVELOPMENT OF AWJ TECHNOLOGY

AWJ technology was developed in the early 1980s from the WJ process. Earlier, in the 1960s, it was observed that a jet of steam or air in a pipeline leakage could easily cut a wooden beam [1]. In the same period it was also known that high-speed water droplets could damage airplane wings [2]. These findings led to the first uses of high-speed WJs in industrial applications [3], while the first application of WJs in mining began at the start of the 20<sup>th</sup> century [4]. In 1983 the first commercial system, known as injection AWJ, was available [5]. In this system, hard abrasive particles are added to the WJ, which makes it possible to machine practically any material.

Since then the AWJ process has evolved very rapidly, and today it is one of the most promising technologies. A year later, the first suspension AWJ was developed; in this case a suspension of water and abrasive is pressed through a nozzle where a high-speed jet is formed. Even if the suspension system is, in many aspects, (higher efficiency, better machining performance) superior to the injection AWJ system, it is not used so much due to the higher degree of wear of the components and the longer starting and stopping times for the jet. Figure 1 shows the historical development of the WJ and AWJ technologies.



Sl. 1. Razvoj postopka obdelave z VC in AVC  
 Fig. 1. Historical development of WJ and AWJ technology.

Dandanes se najbolj uporabljajo tako imenovani injekcijski sistemi za obdelavo z AVC, katerih načelo delovanja je podrobneje predstavljen v naslednjem poglavju.

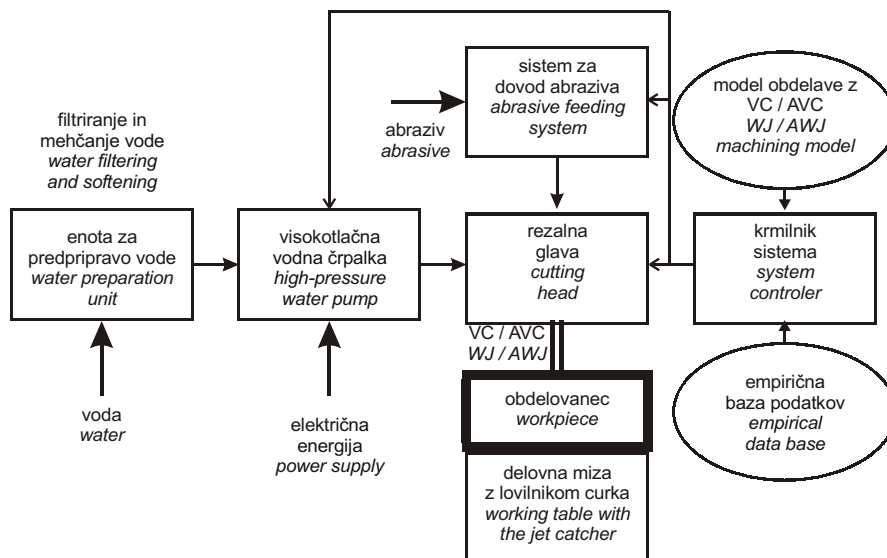
As mentioned before, today, the most common systems are AWJ, the working principle of which is explained in more detail in the next section.

## 2 NAČELO DELOVANJA INJEKCIJSKEGA SISTEMA Z AVC

## 2 WORKING PRINCIPLE OF THE INJECTION AWJ SYSTEM

Injekcijski sistem za obdelavo z AVC v splošnem sestavljajo: visokotlačna vodna črpalka (batna črpalka ali hidravlični ojačevalnik), rezalna glava, sistem za dovod in doziranje abraziva, delovna miza, lovilnik curka po obdelavi ter krmilni sistem, kakor prikazuje shema na sliki 2.

The main components of an injection AWJ system are: a high-pressure water unit (plunger pump or hydraulic amplifier), a cutting head, an abrasive feeding system, a working table, a jet catcher and a controlling unit, as shown in Figure 2.



Sl. 2. Shema sistema za obdelavo z AVC  
 Fig. 2. Main components of an injection AWJ cutting system

Z visokotlačno črpalko se tlak vode dvigne na nekaj sto MPa. Danes se za AVC običajno uporablja tlak 400 MPa, kar je odvisno od uporabe, v prihodnosti pa se bodo najverjetneje uporabljali tlaki do 1000 MPa. V rezalni glavi nastane curek vode z veliko hitrostjo, abraziva in zraka, ki predstavlja orodje. Sama rezalna glava je sestavljena iz vodne šobe, kjer najprej nastane vodni curek z veliko hitrostjo, ki gre skozi mešalno komoro, v katero se dovaja abrazivne delce. Pod mešalno komoro je nameščena fokusirna šoba, kjer se abrazivni delci pospešujejo do hitrosti, ki omogočajo odnašanje materiala obdelovanca. Zaradi VC z veliko hitrostjo se ustvari podtlak, kar ima za posledico vsesavanje zraka skozi dovod abraziva. Tok zraka ima pomembno funkcijo prenosa abraziva v mešalno komoro in začetnega pospeševanja abraziva. Obdelovanec je običajno vpet na delovno mizo, podajalno gibanje pa opravlja rezalna glava (orodje), ki je pritrjena na postavljalni sistem. Celoten sistem za obdelavo z AVC je računalniško krmiljen in nastavlja optimalne obdelovalne parametre (podajalna hitrost, tlak vode, masni tok abraziva itn.). Sila curka je običajno med 10 in 20 N, kar omogoča preprosto vpenjanje in rezanje kompozitnih materialov in tankostenih struktur brez poškodb. Pri obdelavi z AVC je treba poudariti, da obdelovanec pride v stik z vodo, kar je treba upoštevati pri materialih, občutljivih na vodo.

### 3 PODROČJE UPORABE TEHNOLOGIJ VC IN AVC

Zaradi svoje enkratne lastnosti obdelave praktično vseh materialov je AVC vsestransko orodje. Sistemi za obdelavo z AVC omogočajo tudi obdelavo z VC, kar bistveno razširi področje uporabe rezanja na utrjevanje in pripravo površin ter celo na preoblikovanje pločevine. Na sliki 3 so prikazane uporabe VC in AVC.

V nadaljevanju so predstavljene uporabe AVC in VC, ki so zanimive predvsem na področju orodjarstva, tako izdelave orodij kakor tudi pri načrtovanju tehnologije preoblikovanja. Prikazano je koračno preoblikovanje pločevine z VC, izdelava 3D oblik, vrtanje globokih lukenj in odstranjevanje trdih površinskih slojev z AVC.

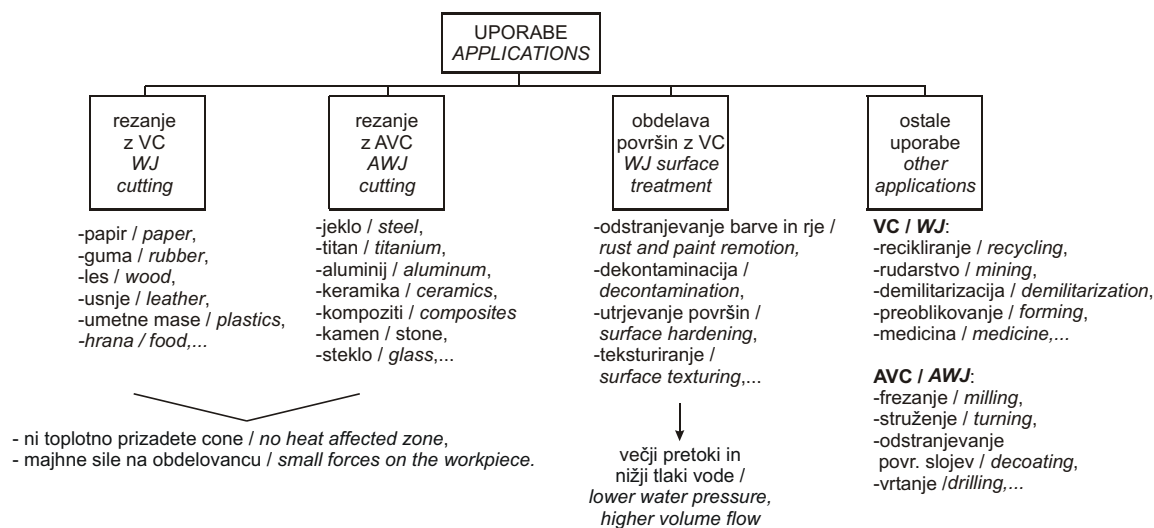
The water pressure is raised in the high-pressure unit to several hundreds of MPa, depending on the selected application. For AWJ, today, the most commonly used water pressure is up to 400 MPa, but in the future it seems that pressures up to 1000 MPa are very likely to be used. A high-speed AWJ composed of abrasive, water and air is formed in the cutting head, which represents the tool. There is an orifice at the top of the cutting head, where a high-speed WJ is formed. The fully developed WJ passes through the mixing chamber, where abrasive particles are entrained from the abrasive feeding system. The focusing tube is fixed on the other side of the mixing chamber and aligned with the orifice. There the abrasive particles are accelerated to velocities that enable the material-removal process in the workpiece. In the mixing chamber, an under pressure is established as a result of the high-speed WJ, and this initiates an air flow through the abrasive inlet. This air flow has an important role in the acceleration process of the abrasive and in its transportation into the mixing chamber. In most cases the workpiece is fixed on the working table and the jet moves along the contour that has to be cut. The control unit optimally adjusts the process parameters (cutting-head kinematics, water pressure, abrasive mass flow, stand-off distance, impact angle of the jet, etc.). Because the force of the jet is relatively small (in the range of 10 to 20 N), no special clamping systems are required, and the process is adequate for machining composite and hollow structure parts. In the case of machining water-sensitive material, it is important to take into account that the workpiece will come into contact with water.

### 3 APPLICATION FIELDS OF WJ AND AWJ TECHNOLOGY

Due to its unique characteristic of being able to machine practically any known material, the AWJ is a multifunctional tool. All commercial AWJs can also be used for WJ machining, which further increases the application fields from cutting to surface preparation, cleaning, forming, etc. Figure 3 shows the application fields of this technology.

From this wide field of application we will further present the incremental forming of sheet metal with a WJ, the machining of 3D features, small deep-hole drilling and decoating or hard-top-layer removing with the AWJ. All these applications have tremendous potential in the toolmaking industry for producing tools and for technology-planning purposes.





Sl. 3. Uporabe obdelave z VC in AVC  
 Fig. 3. Application fields of AWJ and WJ technology

### 3.1 Koračno preoblikovanje z VC

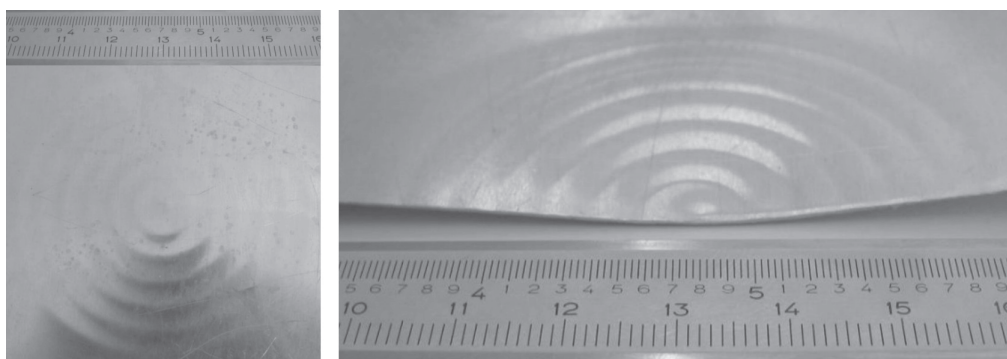
Na področju preoblikovanja smo opravili raziskavo možnosti uporabe VC z velikimi hitrostmi za koračno preoblikovanje pločevine [6]. Prvi rezultati so pokazali, da se lahko VC uporabi kot orodje, ki s primerno nastavitvijo parametrov postopka preoblikuje pločevino v poljubno obliko. Na sliki 4 je prikazan rezultat poskusa koračnega preoblikovanja aluminijaste pločevine debeline 0,3 mm. Izkazalo se je, da je v material mogoče vnesti plastične deformacije, ne da bi se pri tem poškodovala površina obdelovanca.

Že samo rezanje z AVC je zelo uporabno pri izdelavi rondel in preizkušancev na področju preoblikovanja pločevine. Cene običajnih sistemov

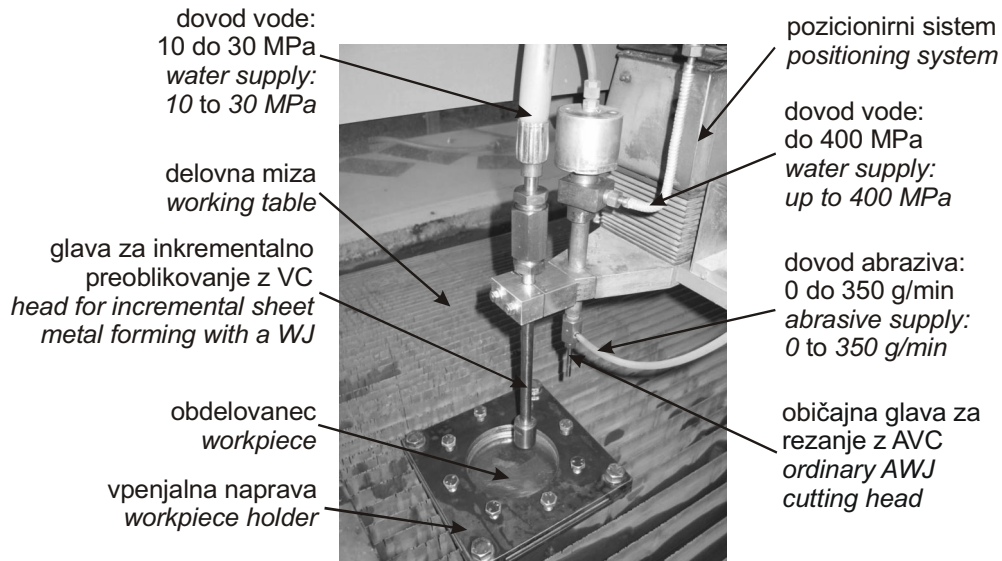
### 3.1 Incremental sheet-metal forming with a WJ

In the field of forming we made a feasibility study of incremental sheet-metal forming with a high-speed WJ [6]. The first results are extremely encouraging and show that it is possible to form sheet metal with a desired shape by using a WJ with the proper process-parameters setup. Figure 4 shows one of the first results of incremental sheet-metal forming of a 0.3-mm-thick aluminum alloy plate. By using a WJ as a forming tool it is possible to put plastic deformations in the material without damaging the workpiece surface.

AWJs are already widely used as cutting tools in sheet-metal forming, especially in prototype development and for material-testing purposes. Today, a commercial system for AWJ cutting costs be-



Sl. 4. Koračno preoblikovanje pločevine z VC [6]  
 Fig. 4. Incremental sheet-metal forming with a high-speed WJ [6]



Sl. 5. Kombiniran sistem za rezanje z AVC in koračno preoblikovanje z VC [6]  
 Fig. 5. Combined system for AWJ cutting and WJ incremental forming [6]

za obdelavo z AVC se gibljejo med 150 in 300 tisoč evrov. Za nadgradnjo takega sistema v sistem, ki bi omogočal tudi koračno preoblikovanje bi bilo treba vložiti še nadaljnjih 50 do 100 tisoč evrov, ker je za preoblikovanje potrebna črpalka z večjim pretokom vode. Primer take nadgradnje je prikazan na sliki 5, kjer je poleg običajne glave za rezanje z AVC pritrjena še dodatna glava za koračno preoblikovanje z VC.

Sistem, prikazan na sliki 5, omogoča rezanje in koračno preoblikovanje pločevine, kar je zelo uporabno predvsem v prototipnih in majhnih serijah ter pri raziskavah in načrtovanju tehnologije preoblikovanja pločevine.

### 3.2 Izdelava 3D oblik z AVC

Pri izdelavi orodij je poleg 2D oblik treba narediti številne 3D oblike v težko obdelovalne materiale. V ta namen smo opravili raziskavo uporabnosti AVC ter primerjavo z drugimi primernimi postopki, to so žična erozija, lasersko rezanje ter frezanje z velikimi hitrostmi [7]. Določili smo dva načina obdelave. Prvi način vsebuje obdelavo oblik, ki se lahko izdelata brez nadzora penetracije AVC, ter jo poimenovali 2,5D obdelava. V drugo skupino smo uvrstili obdelavo tistih oblik, pri katerih je treba nadzorovati globino penetracije curka, kar smo označili kot 3D obdelavo.

Pri 2,5D obdelavi z AVC je treba upoštevati določene značilnosti postopka, to sta

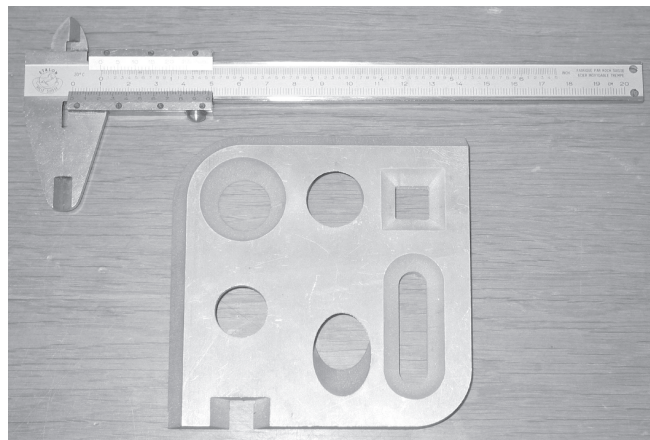
tween 150 and 300 thousand euros. To upgrade such a system in order to have a combined cutting and incremental forming system, an additional investment of 50 to 100 thousand euros is required. For such an application, an additional forming head and water pump are needed, because for forming operations a pump with a higher water-flow rate is required. This kind of combined system is shown in Figure 5, where besides an AWJ cutting head, a head for incremental forming is placed.

The system shown in Figure 5 is very useful for prototype and small-batch production, but also as a powerful tool for technology planning in the field of sheet-metal forming, where the development time can be drastically reduced.

### 3.2 Machining of 3D features with an AWJ

In the toolmaking industry, as well as 2D, many 3D features are also commonly encountered, which have to be machined in hard-to-machine materials. In order to define the possibilities of AWJ in the toolmaking industry, we made a comparison with high-speed milling, wire EDM and laser cutting [7]. We have defined two types of machining, 2.5D and 3D. In the first case we controlled the process in two directions, while in case of 3D machining we also controlled the depth of penetration of the AWJ in the workpiece.

In 2.5D machining some characteristics of the AWJ process, like the taper of the cut and the curvature of the cutting front, have to be taken into



Sl. 6. Izdelava 2,5D oblik z AVC [7]  
 Fig. 6. Machining of 2.5D features with a AWJ [7]

stožčasta oblika reza in ukrivljenost rezalnega čela v obdelovancu. Slednje je še posebej pomembno pri spremembah smeri obdelave. Na sliki 6 so prikazane 2,5D oblike, izdelane z AVC.

2,5D oblike na sliki 6 so bile, zaradi primerjave z drugimi postopki, izdelane tudi z žično erozijo in rezkanjem z velikimi hitrostmi. Iz študije je bilo razvidno, da običajni sistemi za rezanje z žično erozijo ne omogočajo izdelave posameznih oblik, v primeru rezanja z velikimi hitrostmi pa so potrebna številna prevpenjanja.

Bistveno bolj zahtevna je izdelava 3D oblik, kjer je treba nadzorovati globino penetracije AVC v obdelovanec. To je mogoče izvesti s krmiljenjem parametrov postopka med samo obdelavo ter z ustrezno kinematiko AVC vzdolž obdelovanca. Primer 3D oblik je podan na sliki 7, kjer sta bila z AVC izdelana pravokotna žepa v aluminij in jeklo.

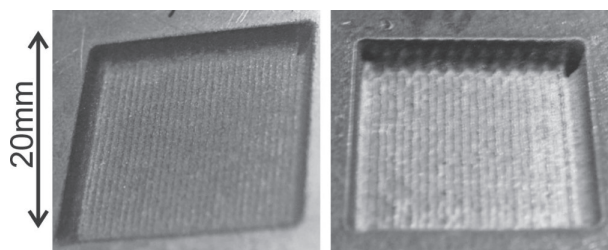
V obeh primerih se je postopek obdelave z AVC izkazal kot primerna tehnologija, predvsem zaradi zmožnosti obdelave praktično kateregakoli

account. It is very important to know how much the cutting front is curved and take appropriate control actions, especially when cutting corners. Figure 6 shows some 2.5D features made by AWJ.

To compare the AWJ process with other processes, the features in Figure 6 were also machined by wire EDM and high-speed milling. It was observed from these studies that a standard wire EDM system cannot machine all the features, and in the case of high-speed milling, some overclamping of the workpiece would be required.

3D features are much more complicated to machine, where the depth of penetration of the AWJ in the workpiece has to be controlled. The depth-of-penetration control can be executed using the appropriate kinematics or by optimal control of the process parameters. As a case study we machined two rectangular pockets in aluminum alloy and steel, as shown in Figure 7.

In both cases, 2.5D and 3D AWJ machining proved itself as a useful technology in the toolmaking industry for its unique capability to machine practically any kind of material. Furthermore, no relevant HAZ is present on the machined surface. Taking into account



Sl. 7. Izdelava 3D oblik z AVC [7]  
 Fig. 7. Machining of 3D features with a AWJ [7]

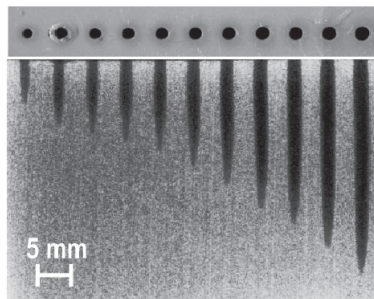
materiala ter odsotnosti toplotno prizadete cone. Z nadaljnjim razvojem ima obdelava z AVC veliko možnosti za nadomestitev že uveljavljenih tehnologij na področju orodjarstva.

### 3.3 Vrtanje majhnih in globokih lukenj z AVC

V orodjarstvu, še posebej pri izdelavi kalupov za brizganje, se pojavlja veliko povpraševanje po izdelavi majhnih globokih lukenj v materiale, ki jih drugače težko obdelujemo. Navadno v takih primerih uporabljamo elektroerozijo, laser in elektronski snop. Slaba stran vseh teh postopkov je, da na površini luknje povzročajo toplotno vplivno območje (TVO). V primeru vrtanja z AVC je TVO praktično zanemarljivo. Izvedena je bila raziskava [8], pri kateri smo opazovali vpliv parametrov postopka na obliko izvrtane luknje v aluminij in v orodno jeklo OCR 12 (utrjeno in neutrjeno). Slika 8 prikazuje rentgensko fotografijo izvrtanih lukenj.

AVC omogoča vrtanje v vsak material. Celo v steklo, ki se uporablja kot akustični izolator v notranjosti stavb. Primer take uporabe je prikazan na sliki 9, kjer so luknje s premerom manj kot 1 mm zvrtnane v steklo debeline 5 mm.

Glavni problem pri vrtanju lukenj z AVC v steklo je zanesljivost postopka. Zahteva naročnika je izvrtati do 40.000 lukenj na kvadratni meter steklene plošče. V primeru napake na eni sami luknji nastane izmeček. Najbolj pogost vzrok za napako je zamašitev dotoka abraziva. V takem primeru sama voda razbije steklo na mestu, kjer bi morala biti luknja.



Sl. 8. Rentgenska slika v aluminij izvrtanih lukenj [8]  
Fig. 8. An X-ray photograph of holes drilled in aluminum alloy [8]

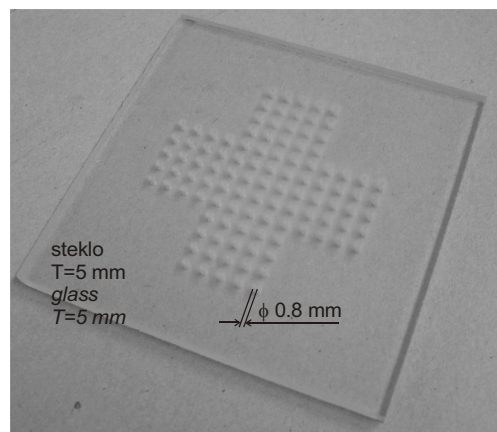
all of these facts, it can be concluded that by using AWJ instead of other processes, complex features in materials with advanced properties can be machined much better, more safely, and more quickly.

### 3.3 AWJ small and deep hole drilling

In the toolmaking industry, especially in the production of molding tools, there is a big demand for the machining of small deep holes in hard-to-machine materials. For small- and deep-hole drilling in such materials EDM, laser and electron-beam machining (EBM) are normally used. The weak point of all these processes is that they produce a HAZ on the surface of the hole. In the case of AWJ drilling the HAZ is practically irrelevant. A study was carried out [8] where the influence of the process parameters on the hole shape drilled in aluminum alloy AlMg1SiCu and steel OCR12 (hardened and non hardened) was observed, as shown in Figure 8.

Using AWJ, holes can be drilled in any material, even in glass, which can be used as acoustic isolation in buildings. An example of this application is shown in Figure 9, where holes of less than 1 mm in diameter are drilled in 5-mm-thick glass.

The main problem of drilling in glass for this application is the reliability of the process. The customer requirement is to drill up to 40,000 holes on 1 square meter of glass plate. If just one of these holes is not machined well, a useless product has been made. The most common reason for this is abrasive jamming. This problem happens when the water alone breaks the glass in the place where the hole was meant to be.



Sl. 9. Luknje, vrtane z AVC v 5 mm debelo steklo  
Fig. 9. Holes drilled by AWJ in 5-mm-thick glass

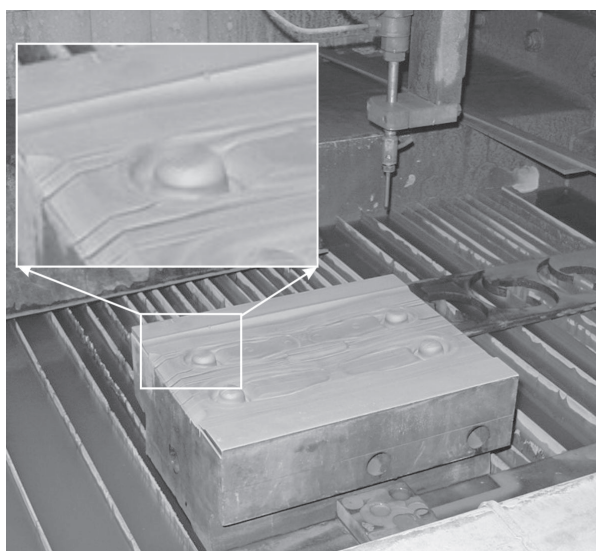


### 3.4 Odstranjevanje utrjenih površinskih slojev

V primeru obnove obrabljenega orodja za hladno utopno kovanje je problematičen utrjen površinski sloj, ki ga je treba odstraniti. Običajno to izvajamo z rezanjem z velikimi hitrostmi s posebno trdimi nanosi na rezkalnem orodju. Tudi pri takih rezalih je opazna obraba. Za odstranitev utrjenega sloja s površine 400 kvadratnih mm poškodujemo ali uničimo kar nekaj rezkalnih orodij, kar nanese skupaj s stroški obdelave te površine okrog 400 evrov, za to pa porabimo več ko dve uri. Odstranjevanje utrjenih površinskega sloja takega orodja z AVC je prikazano na sliki 10 in je bilo izvedeno v LAT. V tem primeru smo porabili manj ko 1 uro časa, obdelava pa je stala okrog 150 evrov.

### 3.4 Decoating of hard surface layers

The hard layer on a worn cold forging tool is always difficult to remove when the renewing of such a tool is planned. Conventionally, this is done by high-speed milling with an extra-hard-coated tool. Even with such a tool, however, rapid wear is present. To remove the hard coating from a 400-square-mm area, several milling tools are damaged or destroyed, together with the machining costs of around 500 euros, and it takes more than two hours to complete the process. The decoating with AWJ of such a tool, shown in Figure 10, was performed in LAT. In this case it takes less than 1 hour and costs about 150 euros.



Sl. 10. Odstranjevanje trdih površinskih slojev na obrabljenem orodju za hladno kovanje  
Fig. 10. Decoating of hardened layer on a worn cold-forging tool

#### 4 RAZVOJNA PODROČJU OBDELAVE S CURKI Z VELIKIMI HITROSTMI

Razvoj na področju obdelave s curki z velikimi hitrostmi, kamor spadata AVC in VC, gre v dveh smereh. Na področju gradbeništva je v velikem vzponu uporaba VC za čiščenje ter AVC za rušenje ter rezanje in vrtanje armiranega betona. Druga smer razvoja pa gre v smeri izboljšanja natančnosti obdelave, miniaturizacije izdelkov ter večosne obdelave.

Slednje je za področje orodjarstva bistveno bolj zanimivo. V zadnjem času so na voljo vodne črpalke, ki omogočajo tlake do 690 MPa, razvijajo pa se nove s tlaki do 900 MPa in več [9]. Na področju

#### 4 FURTHER DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF HIGH-SPEED JET TECHNOLOGY

The developments in the field of high-speed jet technology, where the AWJ and WJ have a dominant role, goes in two main directions. In the field of civil engineering and construction WJs are used for cleaning and surface treatment, while AWJs are used for demolition, cutting and drilling of armored concrete. The other direction is the development of multi-axes high-precision machining systems to be used in the field of micro-machining.

From the toolmaking point of view, the developments in the direction of miniaturization are very interesting. The new water-pressure units can reach pres-

razvoja rezalnih glav se intenzivno iščejo nove rešitve, ki bi omogočale AVC z boljšimi obdelovalnimi lastnostmi. Premeri AVC se manjšajo, obstajajo že curki s premerom 50 mm, razvijajo se abrazivi s premerom nekaj nm [10]. Z namenom izboljšati obdelovalne lastnosti AVC so bile opravljene raziskave na področju dodajanja polimerov v vodo [11]. Veliko pozornosti pa se v zadnjem času posveča izboljšavi samega stroja za obdelavo z AVC v smislu izboljšanja dinamičnih in statičnih lastnosti, ki zagotavljajo večjo natančnost izdelave. Nove tehnike ([12] in [13]) in strategije rezanja, kakršno je rezanje z več prehodi [14], osciliranje curka [15] in modulacijske tehnike [16], pa omogočajo odpravo napak, npr. strijavost in stoščastost reza in izboljšajo hrapavost reza. V določenih primerih, npr. rezanje z AVC v več prehodih [14], smo dokazali, da je mogoče izboljšati kakovost rezanja, pri tem pa skrajšati čas in stroške rezanja.

## 5 SKLEPI

Obdelava z AVC oz. s curki z velikimi hitrostmi nasploh ima velike možnosti na veliko področjih, od obrtniške proizvodnje in servisnih storitev, vse do avtomobilske in letalske industrije. Zaradi zmožnosti obdelave praktično kateregakoli materiala ima AVC velike možnosti uporabe tudi na področju orodjarstva. Poleg uporab AVC iz predhodne študije [14], se odpirajo nova področja predvsem pri izdelavi orodij iz materialov, ki jih drugače praktično ne moremo obdelati (inženirske keramike, kompoziti) ter pri koračnem preoblikovanju brez poškodbe površine.

Število uporab se hitro širi, prav tako pa se iz dneva v dan vrstijo izboljšave in nadgradnje same tehnologije obdelave s curki z velikimi hitrostmi. Dandanes se ta tehnologija uporablja na področjih, to so medicina, živilska industrija, gradbeništvo, rudarstvo itn. Razvijajo se nove rezalne glave oz. šobe, ki omogočajo nastanek curka z boljšimi obdelovalnimi lastnostmi, obenem pa je veliko dela vložene v razvoj črpalk, ki omogočajo tlake vode do 1000 MPa.

S tako hitrostjo razvoja bo obdelava z AVC v naslednjih nekaj letih dosegala natančnost, ki je zahtevana v orodjarstvu. Rezanje 3D oblik zagotavlja tehnologiji AVC konkurenčno mesto med orodjarskimi rezalnimi tehnologijami. Žično erozijsko in obdelavo z velikimi hitrostmi prekaša predvsem v območju obdelovalnih materialov, preprostosti vpenjanja

ures up to 690 Mpa, and the developers of this equipment anticipate an increase in that water pressure up to 900 MPa, and more will be available soon [9]. In the field of cutting heads, new solutions are being developed that will allow the formation of AWJs with better performance. New cutting heads already enable the formation of AWJs with diameters down to 50 mm, by using abrasive particles with sizes of a few nm [10]. Some investigations were done by using polymer additives in water to increase the machining performance [11]. Also, from the machine point of view, the objective is to improve the static and dynamic characteristics of the system in order to achieve better machining precision. New cutting techniques ([12] and [13]) and strategies, like multipass cutting [14], jet oscillation [15] and modulation techniques [16], enable us to reduce the surface roughness and taper of the cut. In some cases, like AWJ multipass cutting [14], we have proved that it is possible to increase the cutting quality and reduce the machining time and costs at the same time.

## 5 CONCLUSION

In general, it can be concluded that high-speed jet technology has great potential in many fields: from workshop production to automotive and aerospace industries, to mention just a few. Due to the ability to machine any material, AWJ is quickly becoming a valuable machining process in the toolmaking industry, where most of the materials are hard to machine. Materials like composites and ceramics can be easily machined by AWJ and new opportunities are arising in the field of incremental sheet-metal forming with a WJ.

The number of applications where high-speed jet technology can be used is growing very rapidly, and new solutions in this field are in constant development. This technology is today applied in fields like medicine, food production, construction, mining, etc. New cutting heads are being developed with improved performance, and many efforts are being made to develop water pumps that will allow pressures up to 1000 MPa.

With such a rapid development, we feel that this technology will reach the precision that is required in the toolmaking industry within the next few years. Machining 3D features makes AWJ competitive with other commonly used technologies in the toolmaking industry. Compared with wire EDM and high-speed milling, AWJ is already superior in many aspects. It can machine virtually any material,



zaradi majhnih sil in drugih vplivov na obdelovanec ter v večini primerov večji hitrosti odvzema. S tem bo mogoče zmanjšati stroške izdelave orodij, obenem pa bo mogoče obdelovati materiale, ki pomenijo izziv za postopke odrezovanja in elektroerozije.

### Zahvala

Predstavljene raziskave so bile podprte s strani mreže odličnosti "4M" s področja mikroobdelave; številka pogodbe: NMP2-CT-2004-500274 ter mreže odličnosti "VRL-KCiP" s področja zbiranja znanja v proizvodnem strojništvu; številka pogodbe: NMP2-CT-2004-507487, oboje v sklopu šestega evropskega okvirnega programa.

there is no need for special clamping and fixing devices due to the small forces on the workpiece, and in most cases it is much faster and has more options. In many cases it was observed that using AWJ instead of other machining processes could drastically reduce the machining time and costs.

### Acknowledgement

This work has been supported by the "Multi-Material Micro Manufacture: Technology and Applications (4M)" Network of Excellence, Contract Number NMP2-CT-2004-500274 and by the "Virtual Research Lab for a Knowledge Community in Production (VRL-KCiP)" Network of Excellence, Contract Number NMP2-CT-2004-507487, both within the EU 6th Framework Program.

## 6 LITERATURA

## 6 REFERENCES

- [1] Byran, E., L. (1963) High energy jets as a new concept for wood machining. *For. Prod. J.* 13 (8), 305.
- [2] Sato, H. (1996) A view on east and west through a researcher's experience. *Liber Amicorum Prof. Paul Vanherck*, 145-155, *Katholieke Universiteit Lueven*, Belgium.
- [3] Walstad, O., M., P.W. Noecker (1972) Development of high pressure pumps and associated equipment for fluid jet cutting. In: *Proceedings of the First International Symposium on Jet Cutting Technology*, Paper C3, Covery, UK, April 1972.
- [4] Summers, D., A. (1995) Waterjetting technology. *Chapman & Hall*.
- [5] Ojmertz, K., M., C. (1994) Abrasive waterjet machining. Licentiate thesis, *Chalmers University of Technology*, Sweden.
- [6] Jurisevic, B., K.C. Heiniger, K. Kuzman, and M. Junkar (2003) Incremental sheet metal forming with a high-speed water jet. In Kuzman K., Janssen E., Col A., Kerge R., Kessler L., Lenze F.-J., editors, *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference, IDDRG 2003*, 139-148, Bled, Slovenia, 11-15 May 2003. TECOS, Slovenian Tool and Die Development Centre, Celje.
- [7] Jurisevic, B., D. Kramar, K.C. Heiniger, and M. Junkar (2003) New perspectives in 3D abrasive water jet precision manufacturing. In Bley H., editor, *Proceedings of the 36<sup>th</sup> CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems: Progress in Virtual Manufacturing Systems*, 507-512, Saarbruecken, Germany, 03-05 June 2003. University of Saarland, Germany.
- [8] Orbanic, H., M. Junkar (2003) A feasibility study of drilling small holes with abrasive water jet. In Kuzman K., editor, *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Industrial Tools, ICIT 2003*, 343-346, Bled, Slovenia, 8-12 April 2003. TECOS, Slovenian Tool and Die Development Centre.
- [9] Louis, H., M. Mohamed, and F. Pude (2003) Cutting mechanism and cutting efficiency for water pressures above 600 MPa. In Summers D., editor, *Proceedings of the 2003 WJTA American WaterJet Conference*, paper 1-A, Houston, Texas, USA, 16-19 August 2003, WJTA, WaterJet Technology Association.
- [10] Miller, D., S. (2003) Developments in abrasive waterjets for micromachining. In Summers D., editor, *Proceedings of the 2003 WJTA American WaterJet Conference*, paper 5-F, Houston, Texas, USA, 16-19 August 2003, WJTA, WaterJet Technology Association.
- [11] Louis, H., F. Pude and von Rad, Ch. (2003) Potential of polymeric additives for the cutting efficiency of abrasive waterjets. In Summers D., editor, *Proceedings of the 2003 WJTA American WaterJet Conference*, paper 3-D, Houston, Texas, USA, 16-19 August 2003, WJTA, WaterJet Technology Association.

- [12] Olsen, J., J. Zeng, C. Olsen and B. Guglielmetti (2003) Advanced error correction methodology applied to abrasive waterjet cutting. In Summers D., editor, *Proceedings of the 2003 WJTA American WaterJet Conference*, paper 5-D, Houston, Texas, USA, 16-19 August 2003, WJTA, WaterJet Technology Association.
- [13] Knaupp, M., A. Meyer, G. Erichsen, M. Sahney and C. Burnham (2002) Dynamic compensation of abrasive jet properties through 3-dimensional jet control. In: Lake P., editor, *Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Water Jetting*, 75-90, Aix-en Provence, France, 16-18 October 2002, BHR-Group.
- [14] Jurisevic, B., K. C. Heiniger, A. Schuetz and M. Junkar (2003) Feasibilities of abrasive water jet multipass cutting technique. In Summers D., editor, *Proceedings of the 2003 WJTA American WaterJet Conference*, paper 2-A, Houston, Texas, USA, 16-19 August 2003, WJTA, WaterJet Technology Association.
- [15] Chen, F., L. and E. Siores (2001) The effect of cutting jet variation on striation formation in abrasive water jet cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, (41), 1479-1486.
- [16] Henning, A. and E. Westkamper (2003) Modulation of cutting operation with abrasive waterjets. In Summers D., editor, *Proceedings of the 2003 WJTA American WaterJet Conference*, paper 5-G, Houston, Texas, USA, 16-19 August 2003, WJTA, WaterJet Technology Association.

Naslov avtorjev: Boštjan Juriševič  
mag. Davorin Kramar  
prof.dr. Mihael Junkar  
Fakulteta za strojništvo  
Univerza v Ljubljani  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana  
bostjan.jurisevic@fs.uni-lj.si  
davorin.kramar@fs.uni-lj.si  
mihael.junkar@fs.uni-lj.si

Authors' Address: Boštjan Juriševič  
Mag. Davorin Kramar  
Prof.Dr. Mihael Junkar  
Faculty of Mechanical Eng.  
University of Ljubljana  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana, Slovenia  
bostjan.jurisevic@fs.uni-lj.si  
davorin.kramar@fs.uni-lj.si  
mihael.junkar@fs.uni-lj.si

Prejeto: 26.10.2004  
Received:

Sprejeto: 2.12.2004  
Accepted:

Odrpto za diskusijo: 1 leto  
Open for discussion: 1 year

## Ekspertni sistem za nadzor kota upogibanja na numerično krmiljeni upogibni stiskalnici

### Expert System for Metal Bending Angle Control on Numeric Control Bending Press

Vid Jovišević - Mirko Soković

*V prispevku je prikazan posebej razvit programski sistem, poimenovan ES-APKANT, ki omogoča večjo natančnost in boljšo kakovost postopka upogibanja pločevine ter zagotavlja doseganje zahtevanega kota upogibanja pločevine že v prvi stopnji upogibanja. Podani so model hidravlične upogibne stiskalnice PSE 135/3000, ki je primerna za uvajanje programskega sistema, struktura krmilnega sistema stiskalnice in prikaz sistema za nadzor delovanja stiskalnice. Sistem ES-APKANT je preverjen na primeru upogibanja pločevine iz jekla C45U (Č. 1540).*

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: sistemi ekspertni, stiskalnice, upogibanje pločevine, krmiljenje numerično)**

*This paper treated develop expert system ES-APKANT which gives higher accuracy and better quality of metal bending process and guarantee achievement of demanded metal bending angle in first bending operation. The paper shows model of hydraulic bending press PSE 135/3000, which is suitable for implementation of expert system, structure of press numerical control system and description of expert system for bending process control. Expert system ES-APKANT is verified on the example of C45U sheet metal bending.*

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: expert systems, press bending, sheet metal bending, numerical control)**

#### 0 UVOD

Pri uporabi upogibnih hidravličnih stiskalnic na postopek upogibanja pločevine vpliva več dejavnikov. Kot posledica elastičnih deformacij matrice in matrice se upogibni polmer vzdolž upogibice spreminja, kar proizvajalci stiskalnic poskušajo nadomestiti s tehničnimi rešitvami (optimalne poprave oblike upogibnega orodja ali njegove podlage).

Omenjene tehnične rešitve so pravzaprav usmerjene k doseganju zahtevanega kota upogibanja pločevine, pa vendar posamezni proizvajalci stiskalnic niso mogli zagotoviti kota upogibanja s zadostno natančnostjo. Operaterji na upogibnih stiskalnicah se srečujejo s naslednjimi omejitvami:

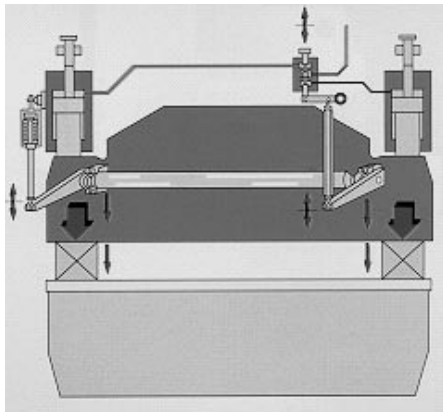
- elastično vračanje pločevine, ki ga ni mogoče natančno vnaprej določiti,
- teoretične formule za določanje giba pehala ne upoštevajo spremembe karakteristik

preoblikovanega materiala (trdota, trdnost, smer valjanja pločevine itn.) ter

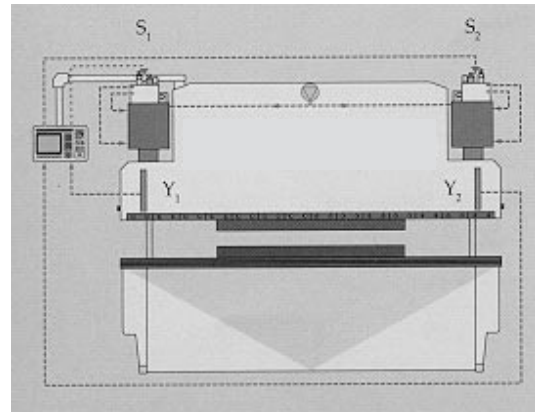
- natančno poznavanje geometrijske oblike orodja.

Te omejitve, kljub sodobnim numeričnim sistemom krmiljenja na stiskalnicah, ki omogočajo številne poprave, zahtevajo, da mora operater na stiskalnici opraviti kar nekaj preverjanj kota upogibanja, vse dokler ne doseže predpisanega kota. V nadaljnjem postopku upogibanja ni mogoče zagotoviti serijske proizvodnje pločevinastih kosov z optimiranimi parametri upogibanja, ker kakršne koli spremembe debeline pločevine ter drugih lastnosti materiala lahko vplivajo na zahtevani kot upogibanja pločevine.

Zaradi tega nastaja problem merjenja in korekcije kota upogibanja pločevine med samim postopkom upogibanja. To omogoča posebej razvit programski sistem ES-APKANT za nadzor kota upogibanja pločevine na hidravlični upogibni stiskalnici PSE 135/3000. ES-APKANT je bil razvit z



Sl. 1. Mehansko krmiljenje pogona



Sl. 2. Elektronsko krmiljenje pogona

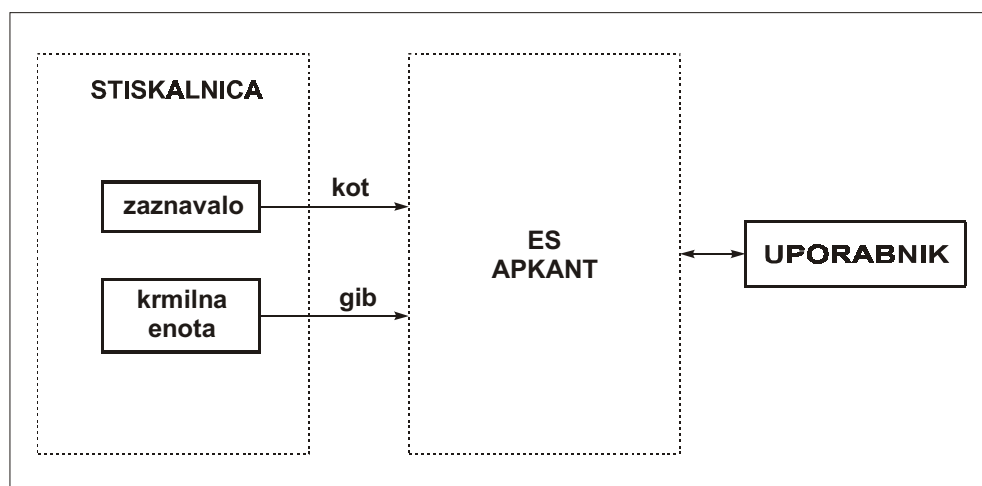
uporabo programske lupine BEST (Black board-based Expert System Toolkit) in domenskih znanj na področju upogibanja pločevine podjetja "JELŠINGRAD" iz Banjaluke.

#### 1 MODEL NUMERIČNO KRMILJENE STISKALNICE ZA UVAJANJE SISTEMA ES-APKANT

Hidravlične upogibne stiskalnice za upogibanje pločevine se izdelujejo v dveh osnovnih izvedbah:

- z mehanskim krmiljenjem pogona (sl. 1) in
- z elektronskim krmiljenjem pogona (sl. 2).

Programski sistem ES-APKANT je načrtovan za uporabo na hidravličnih numerično krmiljenih upogibnih stiskalnicah z elektronskim krmiljenjem. Delovanje pehala krmili servokrmilni sistem. Lega pehala je določena v vsaki točki gibanja s krmilno zanko elektronskega merilnega sistema. Zelo natančna krmilna ventila (S1, S2) omogočata ustrezen dovod olja, da bi dosegli hitrost gibanja pehala ter zahtevano globino prodiranja orodja. Elektronska merilna sistema za nadzor gibanja pehala sta postavljena na dveh mestih (Y1, Y2) in določata predviden položaj pehala med delovnim gibom.



Sl. 3. Sestava krmilnega sistema za nadzor kota upogibanja pločevine na hidravlični upogibni stiskalnici PSE 135/3000

## 2 PRIKAZ NAČRTOVANEGA KRMILNEGA SISTEMA

Struktura načrtovanja krmilnega sistema za nadzor kota upogibanja pločevine na hidravlični upogibni stiskalnici PSE 135/3000 je podana na sliki 3.

Krmilni sistem je načrtovan za družino hidravličnih upogibnih stiskalnic z elektronskim krmiljenjem PSE JELŠINGRAD Banjaluka, kjer se kateri koli lega pehala določa z elektronskim merilnim sistemom. Sistem pa se lahko uporabi tudi na drugih tipih numerično krmiljenih stiskalnic.

Krmilna enota stiskalnice postavlja pehalo tako, da se doseže programirani kot upogibanja pločevine. Postopek se izvede prek elektromehanskega zaznavala, ki je nameščeno pod delovno mizo stiskalnice in je v stalnem stiku s pločevino, ki se upogiba (sl. 4). Zaznavalo neprekinjeno sledi pločevini med postopkom upogibanja in prenaša digitalno informacijo o doseženem kotu upogibanja programskemu sistemu, kateri določa gib pehala prek računalniške krmilne enote RKE.

Mogoča je tudi uporaba laserskega zaznavala za nepretrgano sledenje spremembe kota upogibanja med samim postopkom (sl. 5).

Takšen sistem natančnega merjenja omogoča da računalniško krmiljenje postavlja pehalo

stiskalnice tako, da se doseže zahtevani kot upogibanja, ki ga uporabnik poda programskemu sistemu pred pričetkom postopka upogibanja pločevine. Krmilna enota stiskalnice nenehno postavlja pehalo v nepretrganem postopku upogibanja pločevine. Na ta način programski sistem izravna vse negativne učinke, kot so elastično vračanje pločevine ter trenje med orodjem in pločevino.

## 3 RAZVOJ SISTEMA ES-APKANT

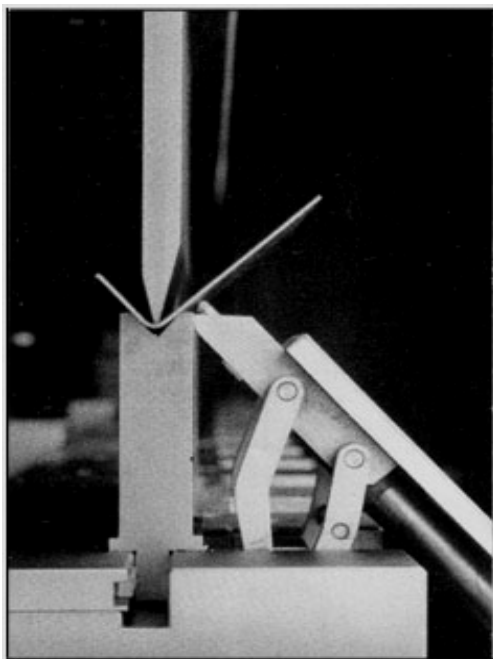
Sestav sistema ES-APKANT je prikazan na sliki 6. Izveden je uporabo treh virov (baz) znanja:

- vhod,
- gib in
- izhod.

Vir znanja "vhod" prevzema tehnološke podatke, potrebne za postopek upogibanja pločevine, ki jih je zbral uporabniški vmesnik od uporabnika.

Vir znanja "gib" določa potreben gib pehala za eno stopinjo spremembe kota upogibanja.

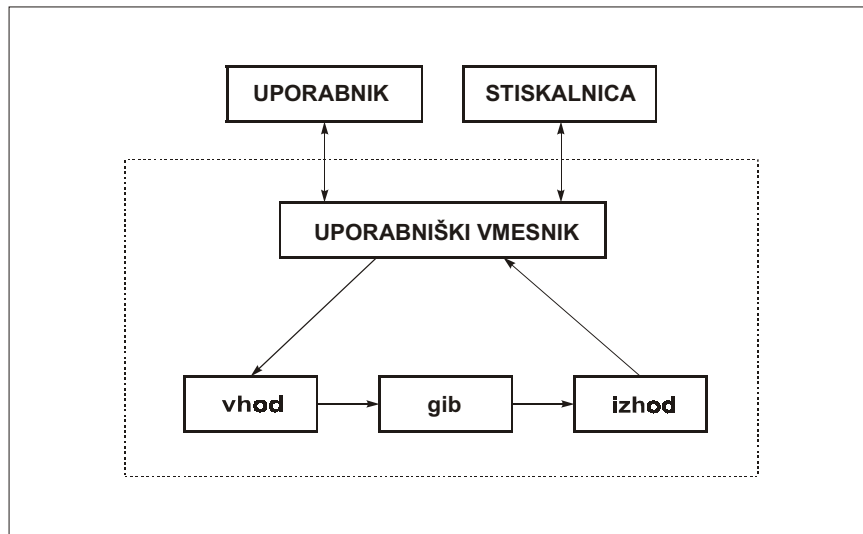
Vir znanja "izhod" vzbudi potreben gib pehala za eno stopinjo spremembe kota upogibanja krmilni enoti stiskalnice vse dokler se kot, izmerjen z zaznavalom, ne ujame s predpisanim kotom.



Sl. 4. Elektromehanično zaznavalo



Sl. 5. Lasersko zaznavalo

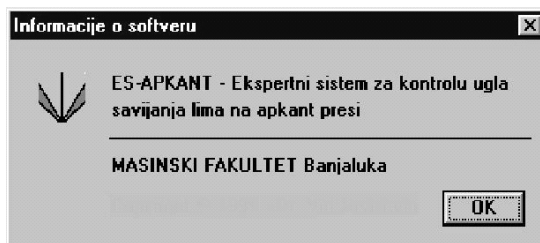


Sl. 6. Struktura programskega sistema ES-APKANT

#### 4 PRIKAZ REZULTATOV UPORABE PROTOTIPNEGA SISTEMA ES-APKANT

ES-APKANT je programski sistem za nadzor kota upogibanja pločevine na hidravličnih numerično krmiljenih upogibnih stiskalnicah. Uvodno dialogno okno (začetni meni) v programu ES-APKANT prikazuje slika 7. Omeniti je treba, da je v tej fazi (prototipnega testiranja) celotni program pisan v srbskem jeziku. Obstaja možnost, da bi se kasneje (po potrebi) ta problem rešil z uporabo nekaterih drugih jezikov, odvisno od uporabnikov.

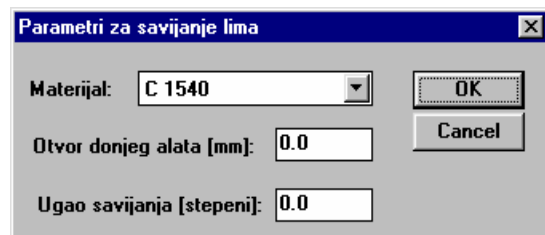
Postopek uporabe programa ES-APKANT poteka po naslednjem postopku. Ob startu aplikacije je treba izbrati postavko za vnos podatkov (*Unos podataka*) v okviru *Ekspert menija*. Tedaj se na zaslonu prikaže podmeni (podokno) za vnos parametrov upogibanja pločevine. Uporabnik najprej definira predpisane parametre upogibanja pločevine (sl. 8).



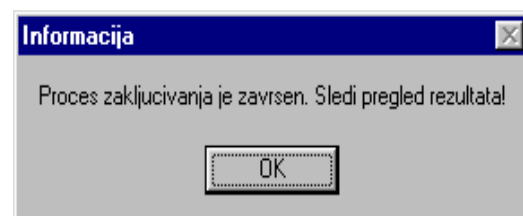
Sl. 7. Uvodno dialogno okno v programu ES-APKANT

Po končanem vnašanju podatkov o vrsti materiala pločevine, ki se upogiba, odprtju spodnjega orodja (matrice) ter zahtevanega kota upogibanja se zažene sklepni modul. Postopek je sklenjen, ko se na zaslonu pojavi podokno, ki pove, da je sklepni modul končal delo (sl. 9).

S pritiskom na gumb OK se uporabniku ponudijo potrebni parametri za začetek postopka upogibanja pločevine, tako kakor je prikazano na sliki 10. To so vhodni parametri, ki jih določa uporabnik, parametri, ki se avtomatsko privzamejo iz baze znanj ter začetna lega kota upogibanja pločevine.



Sl. 8. Vnos parametrov za upogibanje pločevine



Sl. 9. Informacija o končanju postopka sklepnega modula



**Prikaz dobijenih rezultata**

Materijal: C 1540

Otvor donje alata [mm]: 4

Ugao savijanja [stepeni]: 30

Hod pritiskivaca za 1 stepen promene ugla [mm]: 0.17

Savijanje lima

Trenutni ugao [stepeni]: 180.0

Hod pritiskivaca [mm]: 0.0

**Prikaz dobijenih rezultata**

Materijal: C 1540

Otvor donje alata [mm]: 4

Ugao savijanja [stepeni]: 30

Hod pritiskivaca za 1 stepen promene ugla [mm]: 0.17

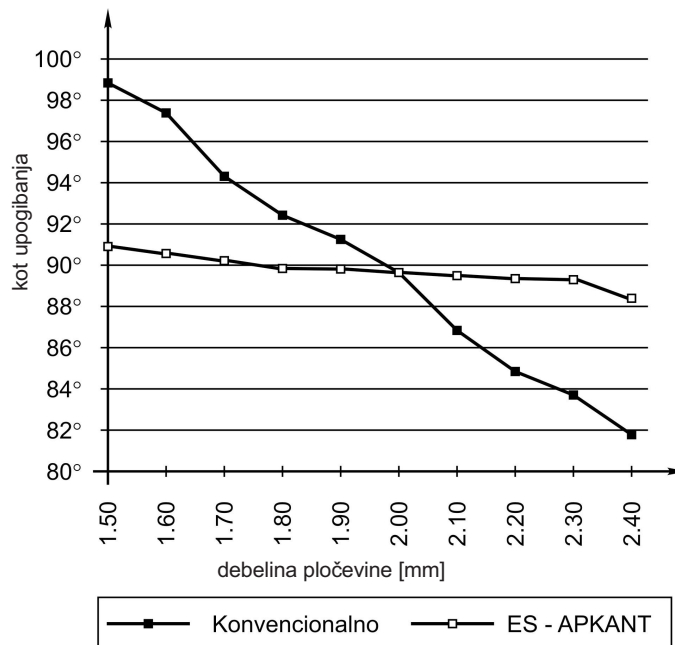
Savijanje lima

Trenutni ugao [stepeni]: 30.

Hod pritiskivaca [mm]: 5.1

Sl. 11. Rezultati po končanem postopku upogibanja

Sl. 10. Začetni parametri postopka upogibanja pločevine



Sl. 12. Primerjava učinkovitosti sistema ES-APKANT in konvencionalnega upogibanja

Pritiskom na gumb START se prične postopek upogibanja na stiskalnici. Pri tem se v poljih podokna za trenutni kot (*trenutni ugao*) in gib pehala (*hod pritiskivača*) prikazuje informacije, ki so injicirane od zaznaval, ki merijo trenutni kot upogibanja.

Ko je dosežen zahtevani kot upogibanja, se na zaslonu pojavi podokno, kakor je prikazano na sliki 11.

Pri tem se gib pehala, ki je določen s programskim sistemom, ne ustavi vse dokler trenutni kot ne doseže predpisanega kota upogibanja pločevine.

Primerjavo učinkovitosti sistema ES-APKANT glede na konvencionalno upogibanje, odvisno od debeline pločevine, prikazuje slika 12.

## 5 SKLEPNE UGOTOVITVE

Programski sistem ES-APKANT je mogoče uporabljati na hidravličnih upogibnih stiskalnicah s servokrmiljenjem in numeričnim krmiljenjem.

ES-APKANT ne uporablja geometrijskih podatkov o orodjih, ker je neposredno merjeni kot

upogibanja nadzorni parameter, ki se uporablja za pozicioniranje pehala z orodjem (patrico).

Vpliv vseh nenadzorovanih motilnih dejavnikov na postopek upogibanja pločevine se nevtralizira s sistemom ES-APKANT. Sistem ne preračunava globine prodiranja pehala z orodjem, saj je načrtovan tako, da pozicionira pehalo glede na zahtevan kot upogibanja pločevine. Ta sistem je odprt za nadaljnji vnos izkustvenih informacij, ki vplivajo na postopek upogibanja pločevine, s čimer se izboljšujejo zmogljivosti sistema ES-APKANT.

Prednosti sistema ES-APKANT glede na

konvencionalni postopek upogibanja pločevine so naslednje:

- zagotavljanje stalne ravni kakovosti upogibanja pločevine,
- minimalen izmet,
- možnost uporabe standardnih orodij,
- možnost oblikovanja programskega sistema za specialne primere.

Potrditev in praktično preverjanje prikazanega prototipnega sistema ES-APKANT sta bili opravljena na hidravlični upogibni stiskalnici tipa PSE 135/3000, podjetja "JELŠINGRAD", Banjaluka.

## 6 LITERATURA

- [1] Gologranc, F. (1987) Uvod v preoblikovanje, *Fakulteta za strojništvo*, Ljubljana.
- [2] Vraneš, S., M. Stanojević (1995) Integrating multiple paradigms within the blackboard framework, *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. 21, No. 3, 244-262.
- [3] Jovišević, V., M. Saradžić, M. Santrač (1997) Projektovanje tehnologije savijanja lima za numeričke apkant prese uz podršku PC računara, *Zbornik radova*, VI. Međunarodna konferencija za fleksibilne tehnologije, MMA '97, Sombor, 719-727.
- [4] Konstrukcijsko-tehnološka dokumentacija za družino hidravličnih stiskalnic PSE Jelšingrad, Banjaluka, 1997-2000.
- [5] Katalog proizvajalca upogibnih stiskalnic AMADA, 2002
- [6] Easy-Form Laser, Nadzor kota upogibanja, *LVD, Euroteh 3* (2004) 3, 74-75.

Naslova avtorjev: prof. dr. Vid Jovišević  
Fakulteta za strojništvo  
Univerze v Banjaluki  
V. S. Stepanovica  
BiH - 78000 Banjaluka  
Bosna in Hercegovina

prof.dr. Mirko Soković  
Fakulteta za strojništvo  
Univerze v Ljubljani  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana

Prejeto: 18.10.2004  
Received:

Sprejeto: 2.12.2004  
Accepted:

Odrpto za diskusijo: 1 leto  
Open for discussion: 1 year

## Poročila - Reports

### 50. obletnica izhajanja Strojniškega vestnika 50<sup>th</sup> Anniversary of Journal of Mechanical Engineering

Na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani je bila 24. marca 2005 slovesnost ob 50. obletnici izhajanja Strojniškega vestnika. Slovesnost so pripravili vsi štirje ustanovitelji in so-izdajatelji: Fakulteti za strojništvo, Univerze v Ljubljani in Univerze v Mariboru, Gospodarska zbornica Slovenije ter Zveza strojnih inženirjev Slovenije.

Slovesnosti so se udeležili tudi rektor Univerze v Ljubljani prof.dr. Jože Mencinger, državni sekretar Ministrstva za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo prof.dr. Janez Možina, direktor Javne agencije za raziskovalno dejavnost RS dr. Franci Demšar, v.d. direktorja Direktorata za tehnologijo prof.dr. Jože Flašker in drugi gostje.

Navzoče so pozdravili dekana Fakultete za strojništvo v Ljubljani prof.dr. Matija Fajdiga in Fakultete za strojništvo v Mariboru prof.dr. Andrej Polajnar ter direktor ARRS dr. Franci Demšar. Sledila sta še zgodovinski oris izhajanja Strojniškega vestnika in predstavitev prve številke 51. letnika, ki ju je pripravil sedanji urednik prof.dr. Andro Alujevič.

Ob tej priložnosti sta Izdajateljski svet in Uredniški odbor Strojniškega vestnika podelila tudi priznanja svojim dolgoletnim sodelavcem, zaslužnim za tako dolgo in uspešno izhajanje. Priznanja so prejeli:

- prof. Boris Černigoj, član Uredniškega odbora 1955-1981;
- prof.dr. Jože Puhar, pomočnik urednika 1971-1985 ter glavni in odgovorni urednik 1985-1992;
- zasl.prof.dr. Adolf Šostar, član Uredniškega odbora 1977-1985 ter predsednik Izdajateljskega sveta 1985-1992;
- prof.dr. Peter Novak, glavni urednik 1992-1999;
- gospa Anja Baras, lektorica in tehnična urednica 1977-1997.

V zimskem vrtu Fakultete za strojništvo v Ljubljani smo pripravili tudi priložnostno razstavo, na kateri je bil predstavljen razvoj Strojniškega vestnika od prve številke do danes. Zbrali in predstavili smo vse zvezke, ki smo jih izdali v petdesetletnem obdobju.

*Suzana Domjan*



*Prof.dr. Matija Fajdiga, predsednik Izdajateljskega sveta, podeljuje priznanje prof. Černigoju, članu prvega Uredniškega odbora*



*Razstava v zimskem vrtu Fakultete za strojništvo v Ljubljani*

## Strokovna literatura - Professional Literature

### Ocene knjig - Books' Reviews

#### **S. Steeb u. a.: Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung**

Založba: Expert Verlag, Eßlingen, 2005.

Obseg: format 14,5 × 21 cm, 514 strani, 326 slik.

1. prva izdaja 1988

2. dopolnjena izdaja 1993

3. predelana izdaja 2005

Preizkušanje gradiv in še posebej kovin ter njihovih zlitin je zelo pomembno področje dejavnosti v elektro- in strojni industriji. Pravočasno ugotavljanje kakovosti določenega materiala oziroma izdelka pomeni zmanjševanje izmečka, višjo stopnjo kakovosti izdelka in tudi nemoteno delovanje naprave ali stroja v zajamčeni obratovalni dobi.

Predloženo delo je nastalo po avtorjevem dvajsetletnem delu na pedagoškem in raziskovalnem področju neporušnih preiskav. Avtor je z enajstimi sodelavci na Tehnični akademiji v Esslingenu celotne neporušne preiskave razdelil v enajst zajetnih poglavij, in sicer:

- Fizikalne osnove presevnih postopkov preizkušanja (S. Steeb).
- Naprave za rentgensko preizkušanje (B. Basler).
- Preizkušanje z izotopi (K. Kolb).
- Preizkušanje površinskih razpok z magnetnimi metodami in uporabo magnetnega prahu (G. Gauss).

- Preizkušanje feromagnetnih materialov z magnetnim poljem, ustvarjenim z ustreznimi sondami (A. Griese).
- Ultrazvočno preizkušanje (V. Deutsch, M. Vogt).
- Vrednotenje rezultatov preizkušanja z ultrazvokom (V. Deutsch, M. Vogt).
- Magnetno induktivni preizkusi ali preizkusi z vrtinčnimi tokovi (H. Wezel).
- Optični načini opazovanja površin in penetrantski načini preizkušanja (W. Stein).
- Fizikalne osnove preizkušanja z vrtinčnimi tokovi in primeri normalnega preizkušanja (F. Schur, T.W. Güttinger).
- Postopki vrednotenja zvočne emisije in prikaz praktičnih primerov (W. Staib).
- Preizkušanje posameznih elementov in sistemov letala z neporušnimi metodami (F. Schur).
- Uporaba akustične emisije pri preizkušanju materialov s posebnim ozirom na problemih lezenja, mikrorazpok, površinskih napak, napak na mejah kristalnih zrn, obrabni postopki, porušitev materialov ipd. (W. Staib).

Delo je namenjeno tehnikom, inženirjem in fizikom, ki se ukvarjajo z uporabo in razvojem neporušnih metod v okviru preverjanja kakovosti izdelkov in napovedovanjem njihove obratovalne zmožnosti.

*Janez Grum*

## Osebne vesti - Personal Events

### Doktorati, magisteriji, specializacije, diplome - Doctor's, Master's, Specialization's and Diploma Degrees

#### DOKTORATI

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani je z uspehom zagovarjal svojo doktorsko disertacijo:

*dne 16. februarja 2005: mag. Boris Jerman*, z naslovom: "Prispevek k raziskavam dinamičnih obremenitvenih stanj stolpnih žerjavov z vrtljivo nadgradnjo".

S tem je dosegel akademsko stopnjo doktorja znanosti.

#### MAGISTERIJI

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani je z uspehom zagovarjal svoje magistrsko delo:

*dne 10. februarja 2005: Danijel Zupančič*, z naslovom: "Mehanske lastnosti sendvič plošč glede na masno gostoto polnila in izdelovalne parametre".

S tem je dosegel akademsko stopnjo magistra znanosti.

#### SPECIALIZACIJE

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru je z uspehom zagovarjal svoje specialistično delo:

*dne 11. februarja 2005: Benjamin Gonc*, z naslovom: "Vrednotenje negotovosti meritev oblik spojnih elementov za polpriklopnike".

S tem je dosegel stopnjo specialista.

#### DIPLOMIRALISO

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani je pridobil naziv univerzitetni diplomirani inženir strojništva:

*dne 23. februarja 2005: Jure DOLINAR.*

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru je pridobil naziv univerzitetni diplomirani inženir strojništva:

*dne 24. februarja 2005: Primož VREŠNJAK.*

\*

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani so pridobili naziv diplomirani inženir strojništva:

*dne 11. februarja 2005: Denis BIZJAK, Miha BRUMEN, Klemen ČUDEN, Rok MALOVRH, Andrej PRIJATELJ.*

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru so pridobili naziv diplomirani inženir strojništva:

*dne 3. februarja 2005: Franc ROSEC;*  
*dne 24. februarja 2005: Anton ILAR, Matjaž RAMŠAK, Boštjan KONEČNIK, Mihael HAJŠEK, Marjan KAMPUŠ, Matej MIHOLIČ, Mirko SRAKA, Milan TEMENT, Dušan ŽOHAR.*

## Navodila avtorjem - Instructions for Authors

Članki morajo vsebovati:

- naslov, povzetek, besedilo članka in podnaslove slik v slovenskem in angleškem jeziku,
- dvojezične preglednice in slike (diagrami, risbe ali fotografije),
- seznam literature in
- podatke o avtorjih.

Strojniški vestnik izhaja od leta 1992 v dveh jezikih, tj. v slovenščini in angleščini, zato je obvezen prevod v angleščino. Obe besedili morata biti strokovno in jezikovno med seboj usklajeni. Članki naj bodo kratki in naj obsegajo približno 8 strani. Izjemoma so strokovni članki, na željo avtorja, lahko tudi samo v slovenščini, vsebovati pa morajo angleški povzetek.

Za članke iz tujine (v primeru, da so vsi avtorji tujci) morajo prevod v slovenščino priskrbeti avtorji. Prevajanje lahko proti plačilu organizira uredništvo. Če je članek ocenjen kot znanstveni, je lahko objavljen tudi samo v angleščini s slovenskim povzetkom, ki ga pripravi uredništvo.

### VSEBINA ČLANKA

Članek naj bo napisan v naslednji obliki:

- Naslov, ki primerno opisuje vsebino članka.
- Povzetek, ki naj bo skrajšana oblika članka in naj ne presega 250 besed. Povzetek mora vsebovati osnove, jedro in cilje raziskave, uporabljeno metodologijo dela, povzetek rezultatov in osnovne sklepe.
- Uvod, v katerem naj bo pregled novejšega stanja in zadostne informacije za razumevanje ter pregled rezultatov dela, predstavljenih v članku.
- Teorija.
- Eksperimentalni del, ki naj vsebuje podatke o postavitvi preskusa in metode, uporabljene pri pridobitvi rezultatov.
- Rezultati, ki naj bodo jasno prikazani, po potrebi v obliki slik in preglednic.
- Razprava, v kateri naj bodo prikazane povezave in posplošitve, uporabljene za pridobitev rezultatov. Prikazana naj bo tudi pomembnost rezultatov in primerjava s poprej objavljenimi deli. (Zaradi narave posameznih raziskav so lahko rezultati in razprava, za jasnost in preprostejše bralčevo razumevanje, združeni v eno poglavje.)
- Sklepi, v katerih naj bo prikazan en ali več sklepov, ki izhajajo iz rezultatov in razprave.
- Literatura, ki mora biti v besedilu oštevilčena zaporedno in označena z oglatimi oklepaji [1] ter na koncu članka zbrana v seznamu literature. Vse opombe naj bodo označene z uporabo dvignjene številke<sup>1</sup>.

### OBLIKA ČLANKA

Besedilo članka naj bo pripravljeno v urejevalniku Microsoft Word. Članek nam dostavite v elektronski obliki.

Ne uporabljajte urejevalnika LaTeX, saj program, s katerim pripravljamo Strojniški vestnik, ne uporablja njegovega formata.

Enačbe naj bodo v besedilu postavljene v ločene vrstice in na desnem robu označene s tekočo številko v okroglih oklepajih

Papers submitted for publication should comprise:

- Title, Abstract, Main Body of Text and Figure Captions in Slovene and English,
- Bilingual Tables and Figures (graphs, drawings or photographs),
- List of references and
- Information about the authors.

Since 1992, the Journal of Mechanical Engineering has been published bilingually, in Slovenian and English. The two texts must be compatible both in terms of technical content and language. Papers should be as short as possible and should on average comprise 8 pages. In exceptional cases, at the request of the authors, speciality papers may be written only in Slovene, but must include an English abstract.

For papers from abroad (in case that none of authors is Slovene) authors should provide Slovenian translation. Translation could be organised by editorial, but the authors have to pay for it. If the paper is reviewed as scientific, it can be published only in English language with Slovenian abstract, that is prepared by the editorial board.

### THE FORMAT OF THE PAPER

The paper should be written in the following format:

- A Title, which adequately describes the content of the paper.
- An Abstract, which should be viewed as a mini version of the paper and should not exceed 250 words. The Abstract should state the principal objectives and the scope of the investigation, the methodology employed, summarize the results and state the principal conclusions.
- An Introduction, which should provide a review of recent literature and sufficient background information to allow the results of the paper to be understood and evaluated.
- A Theory
- An Experimental section, which should provide details of the experimental set-up and the methods used for obtaining the results.
- A Results section, which should clearly and concisely present the data using figures and tables where appropriate.
- A Discussion section, which should describe the relationships and generalisations shown by the results and discuss the significance of the results making comparisons with previously published work. (Because of the nature of some studies it may be appropriate to combine the Results and Discussion sections into a single section to improve the clarity and make it easier for the reader.)
- Conclusions, which should present one or more conclusions that have been drawn from the results and subsequent discussion.
- References, which must be numbered consecutively in the text using square brackets [1] and collected together in a reference list at the end of the paper. Any footnotes should be indicated by the use of a superscript<sup>1</sup>.

### THE LAYOUT OF THE TEXT

Texts should be written in Microsoft Word format. Paper must be submitted in electronic version.

Do not use a LaTeX text editor, since this is not compatible with the publishing procedure of the Journal of Mechanical Engineering.

Equations should be on a separate line in the main body of the text and marked on the right-hand side of the page with numbers in round brackets.



### Enote in okrajšave

V besedilu, preglednicah in slikah uporabljajte le standardne označbe in okrajšave SI. Simbole fizikalnih veličin v besedilu pišite poševno (kurzivno), (npr.  $v$ ,  $T$ ,  $n$  itn.). Simbole enot, ki sestojijo iz črk, pa pokončno (npr.  $\text{ms}^{-1}$ , K, min, mm itn.).

Vse okrajšave naj bodo, ko se prvič pojavijo, napisane v celoti v **slovenskem jeziku**, npr. časovno spremenljiva geometrija (ČSG).

### Slike

Slike morajo biti zaporedno oštevilčene in označene, v besedilu in podnaslovu, kot sl. 1, sl. 2 itn. Posnete naj bodo v ločljivosti, primerni za tisk, v kateremkoli od razširjenih formatov, npr. BMP, JPG, GIF. Diagrami in risbe morajo biti pripravljene v vektorskem formatu.

Pri označevanju osi v diagramih, kadar je le mogoče, uporabite označbe veličin (npr.  $t$ ,  $v$ ,  $m$  itn.), da ni potrebno dvojezično označevanje. V diagramih z več krivuljami, mora biti vsaka krivulja označena. Pomen oznake mora biti pojasnjen v podnapisu slike.

**Vse označbe na slikah morajo biti dvojezični.**

### Preglednice

Preglednice morajo biti zaporedno oštevilčene in označene, v besedilu in podnaslovu, kot preglednica 1, preglednica 2 itn. V preglednicah ne uporabljajte izpisanih imen veličin, ampak samo ustrezne simbole, da se izognemo dvojezični podvojitvi imen. K fizikalnim veličinam, npr.  $t$  (pisano poševno), pripišite enote (pisano pokončno) v novo vrsto brez oklepajev.

**Vsi podnaslovi preglednic morajo biti dvojezični.**

### Seznam literature

Vsa literatura mora biti navedena v seznamu na koncu članka v prikazani obliki po vrsti za revije, zbornike in knjige:

- [1] Tarng, Y.S., Y.S. Wang (1994) A new adaptive controller for constant turning force. *Int J Adv Manuf Technol* 9(1994) London, pp. 211-216.
- [2] Čuš, F., J. Balič (1996) Rationale Gestaltung der organisatorischen Abläufe im Werkzeugwesen. *Proceedings of International Conference on Computer Integration Manufacturing*, Zakopane, 14.-17. maj 1996.
- [3] Oertli, P.C. (1977) Praktische Wirtschaftskybernetik. *Carl Hanser Verlag*, München.

### Podatki o avtorjih

Članku priložite tudi podatke o avtorjih: imena, nazive, popolne poštno naslove in naslove elektronske pošte.

### SPREJEM ČLANKOV IN AVTORSKE PRAVICE

Uredništvo Strojniškega vestnika si pridržuje pravico do odločanja o sprejemu članka za objavo, strokovno oceno recenzentov in morebitnem predlogu za krajšanje ali izpopolnitev ter terminološke in jezikovne korekture.

Avtor mora predložiti pisno izjavo, da je besedilo njegovo izvirno delo in ni bilo v dani obliki še nikjer objavljeno. Z objavo preidejo avtorske pravice na Strojniški vestnik. Pri morebitnih kasnejših objavah mora biti SV naveden kot vir.

### Units and abbreviations

Only standard SI symbols and abbreviations should be used in the text, tables and figures. Symbols for physical quantities in the text should be written in italics (e.g.  $v$ ,  $T$ ,  $n$ , etc.). Symbols for units that consist of letters should be in plain text (e.g.  $\text{ms}^{-1}$ , K, min, mm, etc.).

All abbreviations should be spelt out in full on first appearance, e.g., variable time geometry (VTG).

### Figures

Figures must be cited in consecutive numerical order in the text and referred to in both the text and the caption as Fig. 1, Fig. 2, etc. Pictures may be saved in resolution good enough for printing in any common format, e.g. BMP, GIF, JPG. However, graphs and line drawings should be prepared as vector images.

When labelling axes, physical quantities, e.g.  $t$ ,  $v$ ,  $m$ , etc. should be used whenever possible to minimise the need to label the axes in two languages. Multi-curve graphs should have individual curves marked with a symbol, the meaning of the symbol should be explained in the figure caption.

**All figure captions must be bilingual.**

### Tables

Tables must be cited in consecutive numerical order in the text and referred to in both the text and the caption as Table 1, Table 2, etc. The use of names for quantities in tables should be avoided if possible: corresponding symbols are preferred to minimise the need to use both Slovenian and English names. In addition to the physical quantity, e.g.  $t$  (in italics), units (normal text), should be added in new line without brackets.

**All table captions must be bilingual.**

### The list of references

References should be collected at the end of the paper in the following styles for journals, proceedings and books, respectively:

- [1] Tarng, Y.S., Y.S. Wang (1994) A new adaptive controller for constant turning force. *Int J Adv Manuf Technol* 9(1994) London, pp. 211-216.
- [2] Čuš, F., J. Balič (1996) Rationale Gestaltung der organisatorischen Abläufe im Werkzeugwesen. *Proceedings of International Conference on Computer Integration Manufacturing*, Zakopane, 14.-17. maj 1996.
- [3] Oertli, P.C. (1977) Praktische Wirtschaftskybernetik. *Carl Hanser Verlag*, München.

### Author information

The information about the authors should be enclosed with the paper: names, complete postal and e-mail addresses.

### ACCEPTANCE OF PAPERS AND COPYRIGHT

The Editorial Committee of the Journal of Mechanical Engineering reserves the right to decide whether a paper is acceptable for publication, obtain professional reviews for submitted papers, and if necessary, require changes to the content, length or language.

Authors must also enclose a written statement that the paper is original unpublished work, and not under consideration for publication elsewhere. On publication, copyright for the paper shall pass to the Journal of Mechanical Engineering. The JME must be stated as a source in all later publications.